

Como evoluíram os minerais

A análise do reino mineral desde os primórdios leva a uma conclusão surpreendente: a maioria dos elementos deve sua existência às formas vivas do planeta

POR ROBERT M. HAZEN

No princípio dos tempos, não havia minerais em nenhum lugar do Cosmos. Sólidos de tipo algum poderiam ter se constituído, muito menos resistido ao redemoinho superaquecido formado após o Big Bang. Foram necessários 500 mil anos para que os primeiros átomos – hidrogênio, hélio e uma pequena quantidade de lítio – surgissem desse caldeirão de criação. Milhões de anos mais se passaram até que a gravidade condensasse esses gases elementares nas primeiras nebulosas e, então, colapsasse essas nuvens nas primeiras estrelas incandescentes, densas e quentes.

Todos os outros elementos químicos se sintetizaram e se espalharam pelo espaço apenas quando algumas estrelas gigantes explodiram, formando as primeiras supernovas. E foi somente com a expansão e o resfriamento dos invólucros estelares gasosos que os primeiros frag-

NEBULOSAS são nuvens de poeira ou gás e representam a maior parte da massa do Universo.

SUPERNOVA Explosão de uma estrela com massa no mínimo cinco vezes maior que a do Sol, que ocorre após o hidrogênio nela existentes ser totalmente consumido e ela começar a se expandir.

mentos sólidos de minerais puderam se constituir. Mas, mesmo assim, a maior parte dos elementos e de seus compostos era muito rara e dispersa – ou extremamente volátil – para subsistir sem ser na forma de átomos e moléculas esporádicos no meio dos gases e poeiras recém-produzidos. Uma vez que não formaram cristais, com compostos químicos distintos e átomos organizados em um conjunto constante de unidades repetidas, esses materiais desarranjados não podem ser classificados como minerais.

Provavelmente, os primeiros minerais a se formar foram cristais microscópicos de diamante e grafite, ambos formas puras do abundante elemento carbono. A eles, logo se juntou cerca de uma dúzia de outros microcristais duros, incluindo a moissanita (carboneto de silício), a osbornita (nitreto de titânio) e alguns óxidos e silicatos. Talvez por 10 milhões de anos, essas poucas espécies iniciais – “minerais cerâmicos” – foram os únicos cristais no Universo.

Em comparação, atualmente se

conhecem mais de 4,4 mil espécies minerais na Terra, e ainda há muitas mais por descobrir. O que provocou essa notável diversidade, de uma simples dúzia para milhares de formas cristalinas? A fim de responder a essa questão, recentemente apresentei, em conjunto com mais sete colegas, um novo modelo de “evolução mineral”. A evolução mineral difere da abordagem mais tradicional e centenária da mineralogia, que considera os minerais como objetos importantes, contendo propriedades químicas e físicas particulares, mas, curiosamente, desvinculadas do tempo – a determinante quarta dimensão da geologia. Ao contrário, nossa abordagem se vale da história da Terra para compreender os minerais e os processos que os originaram.

Rapidamente percebemos que a história da evolução mineral começou com o advento dos planetas rochosos, uma vez que esses astros são os instrumentos para a formação mineral. Constatamos que o nosso planeta, ao longo dos últimos 4,5 bilhões de anos, passou por uma série de fases, com novos fenôme-



MATTEO

nos surgindo em cada uma delas, o que enriqueceu e alterou de modo drástico sua mineralogia.

Alguns detalhes dessa história são objeto de intensos debates e certamente mudarão com futuras descobertas; contudo, como ciência, a evolução mineral – e o seu modelo geral – está bem estabelecida. Eu e meus colegas não estamos introduzindo novos dados controversos, tampouco apresentando teorias radicais recentes sobre o que

aconteceu em cada fase da história da Terra. Em vez disso, estamos reformulando uma história ainda mais abrangente que essa, tendo como conceito-guia a evolução mineral.

No entanto, quero enfatizar um aspecto intrigante: a maioria desses milhares de minerais encontrados na Terra deve sua existência ao surgimento da vida no planeta. Se você pensa que todos os planetas estéreis são um palco em que a vida interpreta seu drama evo-

lucionário, pense de novo. Os atores reformaram seu teatro ao longo da peça. Essa observação também traz implicações para a busca por sinais de vida em outros mundos. Ao contrário dos frágeis fragmentos orgânicos, os minerais duros podem fornecer pistas biológicas mais fortes e duradouras.

Os planetas se formam em nebulosas estelares espargidas por matérias provenientes de supernovas. Grande parte da massa da nebulosa se retrai rapidamente,

Retratos da origem mineral

Nos 4,6 bilhões de anos desde a formação do Sistema Solar, os tipos de minerais presentes saltaram de uma modesta quantidade inicial – cerca de uma dúzia na nebulosa pré-solar – para os mais de 4,4 mil encontrados atualmente na Terra. O planeta passou por uma série de fases, representadas à direita desta e das páginas seguintes por cinco imagens que retratam vários processos de formação mineral. Alguns desses processos deram origem a minerais completamente novos, ao passo que outros modificaram a face da Terra ao transformar antigas raridades em materiais abundantes.



Formação da Terra

Há 4,6 bilhões de anos, milhões de planetesimais se formaram no anel de poeira e gás que permaneceu ao redor do Sol recém-inflamado (*ao fundo*) e colidiram, constituindo a Terra (*planeta reluzente*). Mais de 200 minerais, incluindo olivina e zircão, desenvolveram-se nos planetesimais, graças ao derretimento de seus compostos, choques decorrentes de colisões e reações com água. Muitos desses minerais são encontrados em antigos meteoritos condriticos.

◀ Cristale de olivina em palasto (meteorito)

▶ Condrito (meteorito)



Terra negra

Há 4,4 bilhões de anos, a superfície da estéril Terra hadeana é amplamente composta por basalto negro, rocha formada a partir de magma derretido e lava. Os 2 bilhões de anos seguintes presenciariam o desenvolvimento de cerca de 1,5 mil minerais. O derretimento parcial e sucessivo de rochas aglutinou elementos escassos e dispersos, como o lílio (encontrado na lepidolita), berílio (no berílio) e boro (na turmalina). Também colaboraram com esse processo as reações químicas e a erosão das rochas provocadas pelos oceanos primitivos e pela atmosfera anóxica. Minerais formados sob alta pressão, como a jadeíta, foram trazidos para a superfície pelas placas tectônicas.

▲ Lepidolita

▶ Berílio

produzindo a estrela central; entretanto, o material remanescente forma um extenso anel rotativo ao redor desse corpo estelar. Progressivamente, esses fragmentos se agrupam em aglomerados cada vez maiores: esferas de areia, cascalho e argueiro, do tamanho de uma mão, contendo poeira primitiva e abrigando um repertório limitado de cerca de uma dúzia de minerais cerâmicos, junto com vários outros átomos e moléculas.

Modificações drásticas ocorrem quando a estrela nascente se inflama e banha as concentrações próximas de poeira e gás com um fogo depurador. Em nosso Sistema Solar, a ignição estelar ocorreu há aproximadamente 4,6 bilhões de anos. Ondas de calor provenientes do recém-nascido Sol derreteram e mesclaram elementos, produzindo cristais representativos de grupos de novos minerais. Entre as novidades cristalinas dessa fase mais ancestral da evolução mineral, estão as primeiras ligas de ferro-níquel, sulfetos, fosfatos e uma grande quantidade de óxidos e silicatos. Nos meteoritos mais primitivos, encontra-se a maioria des-

PLANETESIMAIS
São pequenos corpos resultantes da aglutinação de poeiras constituídas por diferentes minerais.

ses minerais na forma de “côndrulos”: gotículas resfriadas de rocha outrora derretida (esses antigos meteoritos condriticos também são fontes de evidência de minerais cerâmicos que precederam os côndrulos; os mineralogistas encontram esses minerais na forma de grânulos nano e microscópicos nos meteoritos).

Na primitiva nebulosa solar, os côndrulos rapidamente se agruparam em planetesimais, alguns dos quais atingiram mais de 160 km de diâmetro – grandes o suficiente para derreter parcialmente e se redistribuir em camadas parecidas com as cebolas, que contêm diferentes minerais, incluindo um núcleo denso e rico em metal. Colisões frequentes na entulhada periferia solar deram origem a choques intensos e a mais calor, modificando ainda mais os minerais nos planetesimais maiores. A água também desempenhou seu papel: está presente desde os primórdios, na forma de partículas de gelo na nebulosa pré-solar, as quais, nos planetesimais, derreteram e se incorporaram às fendas e fissuras. As reações químicas com a água resultante geraram novos minerais.

Talvez cerca de 250 espécies diferentes de minerais tenham surgido como consequência desses dinâmicos processos de formação planetária. Esses 250 minerais são os materiais primitivos dos quais todos os planetas devem se constituir, e todos ainda são encontrados nos diversos tipos de meteoritos que atingem a Terra.

TERRA NEGRA

Em seus primórdios, a Terra crescia cada vez mais. Grandes planetesimais engoliam os menores aos milhares, isso até que sobreram somente os dois maiores rivais no nosso sistema orbital: a proto-Terra e um corpo de dimensões bem menores que as de Marte, conhecido como Teia, em homenagem à mãe da deusa-lua grega. Em um paroxismo derradeiro de violência inimaginável, Teia colidiu lateralmente com a proto-Terra, pulverizando suas camadas exteriores e liberando no espaço 100 milhões de trilhões de toneladas de vapores de rocha incandescente, o que formou a Lua. Esse cenário explica o elevado momento angular do sistema Terra-Lua, bem como muitas características incomuns

desta última, incluindo os motivos de a composição de seu corpo ser igual à do manto terrestre (a camada com cerca de 3.200 km de espessura que se estende do núcleo de ferro-níquel à crosta da Terra, cuja espessura varia de 5 km a 50 km).

Em seguida a essa colisão que deu origem à Lua há cerca de 4,5 bilhões de anos, a Terra derretida começou seu processo de resfriamento, que dura até hoje. Apesar de a superfície primitiva terrestre ter hospedado dúzias de elementos raros – urânio, berílio, ouro, arsênio, chumbo e muitos outros – capazes de formar vários tipos de minerais, o impacto com Teia funcionou como uma “recomposição” cósmica. Essa colisão deixou as camadas externas terrestres completamente misturadas, e esses elementos menos abundantes ficaram muito espalhados para formar cristais separados. Nosso planeta era um mundo hostil, desolado, bombardeado sem parar por sedimentos nebulares e amplamente coberto por uma manta de basalto negro, um tipo de rocha formado até mesmo nos tempos modernos, quando a lava se solidifica.

A diversidade mineralógica da Terra aumentou de forma gradativa durante



◀ Turmalina

ÉON HADEANO
Período que se iniciou com a formação da Terra. O termo hadeano vem do grego (Hades) que significa inferno.

o convenientemente denominado éon hadeano (há mais de 4 bilhões de anos), principalmente em razão da repetida solidificação e derretimento da crosta rochosa, bem como das reações erosivas desencadeadas pela atmosfera e oceanos primitivos. Durante ciclos incontáveis, esse derretimento e ressolidificação parciais dos volumes rochosos, assim como as interações entre rocha e água (por exemplo, dissolução de determinados compostos), gradualmente concentrou elementos incomuns, de for-

ma suficiente para formar novas gerações de minerais exóticos.

Nem todos os planetas têm tamanho potencial para a formação de minerais. Mercúrio, pequeno e desidratado, e a Lua terrestre, igualmente árida, congelaram antes mesmo que muita coisa pudesse derreter. Como consequência, calculamos que nesses mundos não haja mais de 350 espécies diferentes de minerais. Com uma modesta provisão de água, Marte talvez tenha se saído um pouco melhor, em virtude das espécies aquosas, como argila e minerais evaporíticos formados quando os oceanos secaram. Estimamos que as sondas da Nasa devam, no futuro, identificar quase 500 minerais diferentes no Planeta Vermelho.

A Terra é maior, mais quente e úmida; portanto, seu processo de formação mineral apresenta uma complexidade maior. Todos os planetas rochosos passaram por uma fase de vulcanismo que derramou basalto por toda a sua superfície, mas o nosso planeta (e talvez Vênus, praticamente do mesmo tamanho) tinha calor interno suficiente para derreter novamente uma parte desse basalto, formando tipos de rocha magmática chamados granitoides, que incluem os gra-



Terra vermelha

Há 2 bilhões de anos, organismos vivos fotossintéticos apresentaram a atmosfera terrestre com um pequeno percentual de oxigênio, alterando de forma drástica sua reação química. Minerais de ferro ferroso (Fe²⁺), abundantes no basalto negro, oxidaram em compostos férricos (Fe³⁺) vermelho-ferroxigênio. Esse "Grande Evento de Oxidação" abriu caminho para o surgimento de mais de 2,5 mil novos minerais, incluindo rodonita (concentrada em minas de manganês) e turquesa. Os microrganismos (verdes) depositaram camadas de um material denominado estromatólito, composto de minerais como carbonato de cálcio.



◀ Corte transversal de um fóssil de estromatólito



▶ Turquesa



Terra branca

Há 700 milhões de anos, a mudança climática cobriu a superfície inteira do planeta com um mineral – o gelo – por milhões de anos. Por fim, o dióxido de carbono liberado pelos vulcões desencadeou um aquecimento global descontrolado e os oxídeos planetários de estufa cobriam a neve. Nas fases de estufa, a erosão das rochas acrescentou à paisagem uma grande quantidade do mineral argiloso de granulação fina, como o caulim. Diferentes camadas de "carbonato de cálcio" depositadas nos rasos e quentes oceanos incluíam cristais de 2 m de altura.



▶ Caulim



▶ Gelo

▼ Rodonita



nitos bege e cinza comuns, usados nas guias e tampos de balcão. Granitos são compostos por uma mistura de minerais de grãos grosseiros, compreendendo o quartzo (os grãos mais presentes na areia da praia), o feldspato (o mais comum de todos os minerais da crosta terrestre) e a mica (que forma finas e reluzentes camadas minerais). Nos grandes planetesimais, já se produziam todos esses minerais em quantidades muito pequenas, mas eles somente aparecem em abundância nos registros geológicos terrestres graças aos processos de formação de granito que ocorrem em nosso planeta.

Na Terra, o derretimento parcial

sucessivo de granitos fez com que se aglomerassem elementos raros "incompatíveis", que, de outra maneira, seriam incapazes de encontrar um possível "lar" cristalográfico nos minerais ordinários. As rochas resultantes contabilizaram mais de 500 minerais diferentes, incluindo cristais gigantes de espécies ricas em lítio, berílio, boro, cério, tántalo, urânio e uma dúzia de outros elementos raros. Levou tempo – alguns cientistas estimam em mais de 1 bilhão de anos – para esses elementos alcançarem concentrações passíveis de formação mineral. É possível que Vênus, o gêmeo planetário da Terra, tenha ficado ativo por tempo suficiente para atingir esse estágio; entretanto, nem Marte nem Mercúrio apresentaram, por enquanto, indícios significativos de granitização em sua superfície.

A Terra aumentou ainda mais sua diversidade mineral durante o processo, em escala mundial, de formação de placas tectônicas, o que gerou uma nova crosta ao longo das cadeias vulcânicas, ao mesmo tempo que a crosta antiga era engolidas nas zonas de subducção, em que uma placa desliza para debaixo da outra e retorna ao manto.

Quantidades enormes de rochas úmidas e quimicamente distintas, tragadas a partir da crosta, derretiram parcialmente, provocando uma concentração adicional de elementos escassos. Produziram-se centenas de novos minerais em depósitos maciços de sulfetos, os quais, atualmente, abrigam as maiores e mais abundantes jazidas de metais do planeta. Outras centenas de espécies minerais apareceram pela primeira vez na superfície terrestre quando as forças tectônicas sublevaram e expuseram uma vasta área de rochas profundas, juntamente com suas reservas de diferentes minerais formados sob alta pressão, como a jadeíta (um dos dois minerais mais conhecidos como jade).

Dito tudo isso, é possível que talvez 1,5 mil minerais distintos encontrados na superfície terrestre, ou próximos a ela, tenham se formado a partir dos processos cíclicos crosta/manto, ocorridos durante os primeiros 2 bilhões de anos do nosso planeta. Mas os mineralogistas catalogaram mais de 4,4 mil espécies minerais variadas. O que aconteceu para triplicar a diversidade mineralógica da Terra?

TERRA VERMELHA

Resposta: a vida. A biosfera distingue a Terra de todos os outros planetas e luas conhecidos e, indiscutivelmente, transformou o ambiente próximo à superfície – de forma mais notável, os oceanos e a atmosfera, mas também as rochas e os minerais.

As formas mais ancestrais de vida – organismos unicelulares primitivos que se "alimentavam" da energia química das rochas – não exerceram muito efeito sobre a diversidade mineralógica da Terra. Para se certificarem disso, os geólogos encontraram formações rochosas biologicamente mediadas, datando de 3,5 bilhões de anos, incluindo recifes compostos de carbonato de cálcio e as chamadas formações ferríferas bandadas (em que óxidos de ferro aparentemente aprisionaram o primeiro oxigênio produzido pela vida). Entretanto, o solo continuava estéril, ainda não havia oxigênio na atmosfera como um todo, o desgaste da superfície era lento e as formas mais ancestrais de vida quase nada contribuíram para alterar a quantidade de minerais presentes ou sua distribuição.



▲ Carbonato de cálcio

FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS

São rochas sedimentares antigas e de precipitação química formada por finos leitos de óxido de ferro alternado com outros carbonatados ou silicatados.

Essa situação mudou em um instante geológico, com o rápido aumento do

nível de oxigênio na atmosfera, graças ao advento da fotossíntese – que tem esse elemento como produto – pelos novos tipos de algas. Essa transição, denominada Grande Evento de Oxidação, ainda suscita um debate acalorado, especialmente no que se refere a quando e à frequência com que começou, pontos ainda não determinados

com precisão pelos cientistas. Mas, há cerca de 2,2 bilhões de anos, o oxigênio atmosférico subiu para um patamar mais de 1% superior ao dos níveis modernos – uma pequena porcentagem, suficiente, porém, para modificar para sempre a mineralogia da superfície terrestre.

O modelo químico seguido por mim e meus colegas sugere que o Grande Evento de Oxidação abriu caminho para mais de 2,5 mil minerais diferentes, muitos dos quais resultaram da oxidação e hidratação de outros minerais desgastados. É improvável que essas espécies cristalinas fossem produzidas em um ambiente anóxico; dessa forma, os processos bioquímicos da Terra parecem ser responsáveis, direta ou indiretamente, pela maioria das 4,4 mil espécies minerais conhecidas em nosso planeta.

TERRA BRANCA

Por 1 bilhão de anos ou mais após o Grande Evento de Oxidação, pouco aconteceu de interessante no reino mineral. Esse intervalo, denominado Oceano Intermediário ou, mais sagazmente, Bilhão Tediado, parece ter sido um período marcado por uma relativa



Terra verde

Há 400 milhões de anos, surgiram organismos pluricelulares, e as plantas colonizaram a Terra, seguidas pelos animais. A decomposição química por plantas e fungos aumentou em grandes proporções a erosão das rochas e a produção de argila (miscelânea de minerais hidratados). Pela primeira vez a superfície do planeta adquiriu sua aparência moderna – e sua atual distribuição de minerais. A vida produziu diretamente minerais como aragonita e calcita (encontrados em lúcio, desde trilobitos até esqueletos humanos), bem como raridades extremas, por exemplo, a hazonita, depositada pelos micróbios.

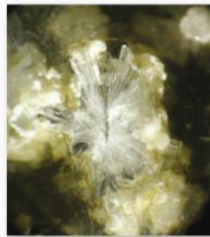
▲ Aragonita

▶ Fóssil de trilobito

estagnação biológica e mineralógica. O “intermediário” do nome refere-se aos níveis de oxigênio: as águas oceânicas próximas à superfície eram oxigenadas, ao passo que as profundas permaneceram anóxicas. A interface entre esses dois domínios aumentou de maneira gradual, mas basicamente não houve o surgimento de nenhuma forma nova de vida, tampouco de alguma espécie mineral.

Contrastando de forma marcante com o Bilhão Tediado, os 100 milhões de anos seguintes presenciaram mudanças notáveis na superfície terrestre. Há cerca de 800 milhões de anos, grande parte dos continentes do planeta localizava-se em um único grande conglomerado perto do equador, chamado Rodínia. Então, as forças tectônicas separaram essa vul-tosa porção de terra, o que resultou em uma faixa litorânea mais extensa, um maior índice pluviométrico e uma erosão rochosa mais acelerada – processos que retiraram dióxido de carbono (retentor de calor) da atmosfera. Como o efeito estufa teve sua força reduzida e o clima esfriou, o gelo polar aumentou.

A expansão crescente de gelo e neve refletiu mais luz solar para o espaço,



▲ Hazonita

centrações atuais, desencadeando, finalmente, um ciclo de aquecimento via efeito estufa. Como o gelo equatorial derreteu, esse episódio de aquecimento descontrolado talvez tenha levado apenas algumas centenas de anos para transformar a Terra de uma caixa de gelo em uma estufa.

Pelos 200 milhões de anos seguintes, nosso planeta passou por um ciclo desses extremos, talvez de duas a quatro vezes. Embora aparentemente poucas, se não nenhuma, espécies minerais surgiram durante esse período agitado, a distribuição de minerais pela superfície mudou drasticamente com cada novo ciclo glacial. Durante as fases de estufa, aumentou rapidamente a produção de minerais argilosos de granulação fina e outros produtos da erosão das rochas, na paisagem estéril, erodida e rochosa. Nas partes mais rasas dos oceanos aquecidos, minerais carbonatados precipitaram em imensas aluviões cristalinas.

ALUVIÕES
Depósitos de sedimentos.

Os ciclos bola de neve/estufa acarretaram consequências profundas para a vida. As eras do gelo interromperam quase todos os ecossistemas, ao passo que os períodos de aque-

cimento trouxeram aumentos abruptos na produtividade biológica. Dentre eles, destaca-se a elevação drástica do nível de oxigênio atmosférico ao fim da última grande glaciação – de um percentual ínfimo para cerca de 15% –, devido, em parte, a um florescimento vigoroso e generalizado de algas na costa litorânea. Muitos biólogos sugerem que essas altas concentrações de oxigênio eram um prelúdio essencial da origem e evolução de grandes animais, com suas demandas metabólicas aumentadas. De fato, os mais antigos organismos pluricelulares conhecidos surgiram nos registros fósseis apenas 5 milhões de anos após a última grande glaciação global.

A geosfera e a biosfera continuaram a evoluir em conjunto, especialmente conforme diversos micróbios e animais aprenderam a desenvolver suas próprias conchas minerais protetoras. O advento dos esqueletos carbonatados levou à precipitação de rochedos maciços de calcário, pontilhando as paisagens terrestres com incontáveis desfiladeiros e cânions. Esses minerais não eram novos, mas seu domínio, sim.

Plantas e fungos trouxeram métodos rápidos de decomposição bioquímica da rocha, aumentando em muito os níveis de erosão das rochas presentes na superfície terrestre, com basalto, granito e calcário. A abundância de minerais argilosos e a taxa de formação de terrenos férteis aumentaram amplamente, fornecendo um habitat sempre em expansão para fungos e plantas maiores e mais diversificados.

Há provavelmente 400 milhões de anos, no período devoniano, a superfície da Terra evoluiu, pela primeira vez, para uma aparência espantosamente moderna – prosperaram florestas verdes, habitadas por uma variedade cada vez maior de insetos, tetrápodes e outras criaturas. E, graças à profunda influência da vida, a mineralogia dos terrenos próximos à superfície terrestre também atingiu seu estado moderno de diversidade e distribuição.

TERRA VERDE

Por quase toda a história do nosso planeta, a terra era inabitável. A radiação ultravioleta solar destruída biomoléculas essenciais e matava a maioria das células. Com os níveis mais altos de oxigênio atmosférico, formou-se uma camada de ozônio estratosférica protetora, escudando a terra subjacente dos raios ultravioleta, o que possibilitou o desenvolvimento de uma biosfera terrestre.

Levou tempo para que a vida na terra prosperasse. É possível que tapetes de algas tivessem colonizado terrenos pantanosos após a fase bola de neve de nosso planeta, porém a mais significativa transformação terrestre teve de esperar o surgimento dos líquens – as primeiras plantas terrestres verdadeiras –, há cerca de 460 milhões de anos. A colonização generalizada da Terra levou outros 10 milhões de anos, com o desenvolvimento de plantas vasculares, cujas raízes penetravam o solo rochoso e serviam de sustentáculos e coletores de água.

Plantas e fungos trouxeram métodos rápidos de decomposição bioquímica da rocha, aumentando em muito os níveis de erosão das rochas presentes na superfície terrestre, com basalto, granito e calcário. A abundância de minerais argilosos e a taxa de formação de terrenos férteis aumentaram amplamente, fornecendo um habitat sempre em expansão para fungos e plantas maiores e mais diversificados.

Há provavelmente 400 milhões de anos, no período devoniano, a superfície da Terra evoluiu, pela primeira vez, para uma aparência espantosamente moderna – prosperaram florestas verdes, habitadas por uma variedade cada vez maior de insetos, tetrápodes e outras criaturas. E, graças à profunda influência da vida, a mineralogia dos terrenos próximos à superfície terrestre também atingiu seu estado moderno de diversidade e distribuição.

A interpretação da mineralogia da Terra como um processo dinâmico e em mutação abre espaço para algumas oportunidades interessantes de pesquisa. Por exemplo, planetas diferentes atingem distintos estágios de evolução mineral. Mundos secos e pequenos, como Mercúrio e a Lua, têm superfície simples com pouca diversidade mineral. Marte, pequeno, porém úmido, saiu-se um pouco melhor. Planetas maiores, como a Terra e Vênus, com suas vastas reservas de substâncias voláteis e calor interno, puderam ir ainda mais longe, formando granitoides.

O que tornou a Terra única, porém, foram o advento da vida e a resultante evolução conjunta de seres vivos e minerais. Como ressaltai anteriormente, minerais podem ser tão úteis quanto os resquícios orgânicos para o reconhecimento de vestígios de vida em outros planetas. É provável, por exemplo, que só os astros onde exista vida sejam generalizadamente oxidados.

Corpos celestes com compostos diferentes podem também ser submetidos a distintas evoluções minerais. A lua jupiteriana Io, rica em enxofre, e Titã, a gelida lua de Saturno repleta de hidrocarbonetos, apresentarão repertórios bem singulares de minerais. O mes-

mo provavelmente vale para Europa e Encélado (luas de Júpiter e Saturno, respectivamente); acredita-se que, por debaixo de suas superfícies congeladas, ambas hospodem oceanos líquidos de água e, assim, sejam locais com grande potencial para vida extraterrestre.

Considerar os minerais em um contexto evolucionário também elucida um tema mais geral: os sistemas em evolução por todo o Cosmos. Estados simples passam a ser cada vez mais complexos em muitos contextos: evolução de elementos químicos nas estrelas, evolução mineral nos planetas, evolução molecular levando à origem da vida e a conhecida evolução biológica, por meio da seleção natural darwiniana.

Portanto, vivemos em um Universo que tende à complexidade: átomos de hidrogênio formam estrelas, estrelas dão origem aos elementos da tabela periódica, esses elementos constituem planetas, que, por sua vez, formam minerais em abundância. Os minerais catalisam a formação de biomoléculas, que levaram à vida na Terra. Nesse contexto geral, os minerais representam um passo inevitável para a evolução de um Cosmos que está começando a se autoconhecer. ■

O AUTOR

Robert M. Hazen é cientista sênior do Laboratório de Geofísica do Instituto Carnegie e professor de ciências da terra da cátedra Clarence Robinson, da George Mason University. Em 1975, recebeu Ph.D. em ciências da Terra pela Harvard University. Escreveu 350 artigos científicos e 20 livros, incluindo *Genesis: the scientific quest for life's origin*, frequentemente explica a ciência a não cientistas por meio de rádio, TV, palestras públicas e videoaulas. A recente pesquisa de Hazen está focada no papel dos minerais na origem da vida. Em sua homenagem, nomeou-se o mineral hazonita, depositado por micróbios no lago Mono (Califórnia), altamente alcalino.

PARA CONHECER MAIS

Mineral evolution. Robert M. Hazen et al., em *American Mineralogist*, vol. 93, págs. 1693-1720, 2008.

Chemical evolution across time and space: from Big Bang to prebiotic chemistry. Organizado por Lori Zalkowski e Jon M. Friedrich. *American Chemical Society*, 2007.

The emergence of everything: how the world became complex. Harold J. Morowitz. *Oxford University Press*, 2003.

Planetary materials. Organizado por J. J. Papke. *Mineralogical Society of America*, 1998.