



ORIGENS DA VIDA

Augusto Daminski
Daniel Santa Cruz Daminski
Estudos avançados 21 (59) 2007

Origens da vida

AUGUSTO DAMINELI

e DANIEL SANTA CRUZ DAMINELI

O que é vida?

EMBORA A PALAVRA vida pareça ter um sentido óbvio, ela conduz a diferentes idéias, tornando-se necessário definir o próprio objeto a que nos referimos neste texto. Para psicólogos, ela traz à mente a vida psíquica; para sociólogos, a vida social; para os teólogos, a vida espiritual; para as pessoas comuns, os prazeres ou as mazelas da existência. Isso é parte da nossa visão fortemente antropocêntrica do mundo. Para uma parte (relativamente pequena) das pessoas, ela traz à mente imagens de florestas, aves e outros animais. Mesmo essa imagem é parcial, já que a imensa maioria dos seres vivos são organismos invisíveis. Os micróbios compõem a maior parte dos seres vivos, a maioria (80%) vivendo abaixo da superfície terrestre, somando uma massa igual à das plantas. Entretanto, os micróbios ainda não ocupam a devida dimensão em nosso imaginário, apesar de mais de um século de uso do microscópio e de freqüentes notícias na mídia envolvendo a poderosa ação de micróbios, ora causando doenças ora curando-as, fazendo parte do ecossistema ou influenciando na produção de alimentos. Esse quadro se deve ao fato de que a vida ainda é um tema recente no âmbito científico, comparado com sua antigüidade no pensamento filosófico e religioso.

Uma concepção muito difundida entre os povos de cultura judaico-cristã-islâmica é que a vida foi insuflada na matéria por Deus, e seria, portanto, uma espécie de milagre e não uma decorrência de leis naturais. É difícil traçar a origem dessa concepção, mas os escritos de Aristóteles (384-322 a.C.) falam da *pneuma*, que seria uma espécie de matéria divina e que constituiria a vida animal. A *pneuma* seria um estágio intermediário de perfeição logo abaixo do da alma humana. A dualidade matéria/vida nos animais (ou corpo/alma nos seres humanos) já aparecia na escola socrática, da qual Aristóteles era membro, embora de modo um pouco diferente. Entre os animais superiores, o sopro vital passaria para os descendentes por meio da reprodução. Entretanto, Aristóteles acreditava que alguns seres (insetos, enguias, ostras) apareciam de forma espontânea, sem serem frutos da “semente” de outro ser vivo. Essa concepção é conhecida como geração espontânea e parece ter sido derivada dos pré-socráticos, que imaginavam que a vida, assim como toda a diversidade do mundo, era formada por poucos elementos básicos. A idéia de geração espontânea está também presente em escritos antigos na China, na Índia, na Babilônia e no Egito, e em outros escritos ao longo dos vinte séculos seguintes, como em van Helmont, W. Har-

vey, Bacon, Descartes, Buffon e Lamarck. Parece que sua dispersão pelo mundo ocidental tenha vindo por intermédio de Aristóteles, dada sua grande influência em nossa cultura.

Um experimento de laboratório de Louis Pasteur (1822-1895) colocou um ponto final na idéia da geração espontânea. Depois dele, passou-se a admitir que a vida só pode vir de outra vida. Curiosamente, contudo, Pasteur dizia que não tinha eliminado totalmente a possibilidade da geração espontânea. De fato, seu experimento não poderia se aplicar à primeira vida, e a idéia de que a vida podia vir da matéria inorgânica continuou em pauta entre outros grandes cientistas. Entretanto, ela mudou para um contexto tão diferente das visões anteriores, que não podemos rotulá-la da mesma forma. Essa nova forma de “geração espontânea” só seria válida para a primeira vida, daí para a frente seria exigida a reprodução.



Figura 1 – A geração espontânea para seres considerados simples foi admitida desde a Antigüidade até o final do século XIX.

Charles Darwin (1809-1882) imaginava que uma poça de caldo nutritivo, contendo amônia, sais de fósforo, luz, calor e eletricidade, pudesse ter dado origem a proteínas, que se transformaram em compostos mais complexos, até

originarem seres vivos. Entretanto, a extensão da evolução para o mundo molecular, como o primeiro capítulo da evolução da vida, só teve progresso a partir das idéias de Alexander Ivanovich Oparin (1894-1980). Ele procurou entender a origem da vida como parte da evolução de reações bioquímicas, mediante a competição e seleção darwiniana, na terra pré-biótica (antes do surgimento da vida).

Quanto ao local onde existiria vida, os vedas e upanishads na Índia imaginavam a existência de partículas de vida permeando todo o Universo. Anaxágoras (~500-428 a.C.) também imaginava que a vida estivesse presente em todo o cosmos. Giordano Bruno, no Renascimento, pregou ardorosamente a existência de outros mundos habitados. A análise de meteoritos feitas por Berzelius nos anos 1830 mostrou a existência de compostos orgânicos no espaço. A partir disso, o físico e químico Savante A. Arrhenius (1859-1927) propôs que, além de produtos orgânicos, a própria vida tivesse se originado no espaço, sendo transportada para cá em meteoritos. Versões dessa idéia foram apresentadas por Richter, Kelvin, Chamberlain e, mais recentemente, por Francis Crick, Fred Hoyle, Chandra Wickramasinghe, John Oró e outros. Nem os defensores dessa hipótese, denominada panspermia, nem os do cenário concorrente (segundo os quais a vida teria se originado na Terra) apresentaram provas robustas sobre o sítio de origem da vida. Na verdade, esse é um problema secundário, ante outras questões mais relevantes.

Ao longo do último século, a origem da vida começou a ser abordada cientificamente, por meio de experimentos de laboratório e estudo de processos teóricos. Ela se tornou um tema eminentemente interdisciplinar, envolvendo cosmologia, astrofísica, planetologia, geologia, química orgânica, biologia molecular, matemática e teoria de sistemas complexos. Nos últimos cinquenta anos ela se desdobrou em diversos subtemas, alguns dos quais alcançaram progressos notáveis. Algumas questões fundamentais continuam, entretanto, sem solução.

Não temos nem sequer um conceito universalmente aceito do que é vida. Por que uma definição como algo que nasce, cresce, se reproduz e morre, não é suficiente para caracterizar a vida? Simplesmente porque existem diversos fenômenos naturais que satisfariam a essa definição. Pense em algo como um incêndio ou uma tempestade, ou mesmo alguns programas de computador. Uma definição como essa não ajuda em nada os biólogos e por isso eles não dependem dela. Em vez de falar em “vida” de modo genérico, o conceito de organismo vivo é muito mais operacional. Um organismo vivo é baseado na célula, onde a informação genética está codificada no DNA (ácido desoxirribonucléico) e se expressa na forma de proteínas. Nota-se que esse conceito é moderno, posterior à invenção do microscópio e à descoberta do código genético. Para chegar a esse ponto, passou-se por diversas modificações ao longo da história, como veremos mais adiante.

É nesse contexto particular que a vida será abordada neste artigo. Mas por que, num panorama com tantas vertentes e possibilidades, nos limitaremos a discutir somente o tipo comum de vida que conhecemos? Existem outros tipos, aqui ou em outros planetas? Como reconhecê-los? A restrição não é porque negamos

a possibilidade de existirem outros paradigmas de vida, mas porque essa é a única que possibilita uma abordagem científica, por apresentar dados observacionais e modelos teóricos. Inúmeras tentativas de formular um conceito geral de vida foram e estão sendo feitas, mas nenhuma delas apresentou vantagens significativas para entender a vida que conhecemos, nem previu a existência de formas ainda desconhecidas que possam ser submetidas à observação. Ainda não existe uma Teoria Geral da Vida e isso restringe nossa capacidade de entendê-la. Só a descoberta de outros exemplares de vida independentes da que conhecemos na Terra poderia nos levar a ampliar os horizontes conceituais. No item final, mostraremos projetos que visam descobrir vida fora da Terra e discutiremos sua factibilidade e sua potencial contribuição para a compreensão da vida no âmbito científico.

Evolução e vida

A evolução é o processo de mudança dos organismos através do tempo, fazendo que os organismos atuais sejam diferentes dos iniciais. Embora exista uma cadeia de continuidade ao longo do tempo, não é fácil inferir as propriedades dos primeiros organismos com base nos atuais. É possível recuperar algumas informações sobre a estrutura corporal dos progenitores das espécies atuais por meio dos fósseis. Isso permitiu fazer um mapa exuberante da evolução ao longo dos últimos ~540 milhões de anos (M.a.). Todos os filós genéticos (arquiteturas corporais) existentes hoje surgiram na chamada “explosão do Cambriano” que ocorreu por essa época. Ela se caracteriza pelo aparecimento de seres multicelulares.

No período pré-Cambriano (era geológica anterior a 570 M.a.) os seres eram unicelulares (feitos de uma única célula), o que dificultou enormemente a formação de fósseis e sua descoberta através de microscópios. Os fósseis de microorganismos foram rastreados até um passado tão remoto quanto 3,5 bilhões de anos (B.a.) atrás. Eles são encontrados em agregados rochosos que ainda hoje são habitados por colônias de bactérias, os chamados estromatólitos,¹ como os da formação chamada de Apex do oeste da Austrália. Eles apresentam onze tipos diferentes de fósseis, mostrando aliás como as células se dividiam e multiplicavam (embora exista quem conteste que eles sejam fósseis verdadeiros). Suas formas são indistinguíveis das algas fotossintéticas atuais (cianobactérias) que infestam diversos ambientes da Terra. Mesmo sendo primitivos para a vida atual, esses fósseis são de organismos tão complexos que não podem ter sido as primeiras formas de vida. Microbiologistas e biólogos moleculares defendem que a cianobactéria teria sido um dos últimos grandes grupos de bactérias a aparecer.

Como recuar nossos estudos mais para trás no tempo? É muito difícil encontrar rochas mais antigas que 3,5 bilhões de anos, pois a superfície do nosso planeta é constantemente reciclada. As rochas da superfície são forçadas a imergir pela tectônica de placas, e nas profundezas da terra elas são cozidas sob pressão. Quanto mais antiga uma rocha, mais rara ela é. Desse modo, não existem esperanças de encontrar fósseis muito mais antigos que 3,5 bilhões de anos, o que interrompe o caminho em busca da origem da vida por meio desse tipo de registro.



Figura 2 – Os fósseis mostram que a evolução transformou as características dos seres vivos ao longo do tempo, gerando diversidade biológica e permitindo que muitos nichos disponíveis na biosfera fossem ocupados. (Arte: Paulo Santiago)

A evolução biológica é um fato surpreendente e inesperado quando temos em mente que o código genético trabalha para fazer uma cópia exata de si mesmo. A dupla hélice é uma garantia extra de fidelidade, providenciando duas cópias de cada informação genética. Se só existissem as forças mantenedoras da identidade, não existiria a diversidade biológica. Contudo, existem processos que levam a imperfeições na reprodução. Esses são “erros” aleatórios, naturais em qualquer processo de cópia em razão da radioatividade ambiental, dos raios cósmicos provenientes do espaço ou de agentes químicos. Eles geram moléculas-cópias diferentes das originais, de modo que, quando a molécula participa da reprodução, o organismo resultante terá (em geral) pequenas diferenças de seu progenitor. Se ele for adaptado às condições do meio ambiente, sobreviverá e poderá deixar descendência, aumentando a diversidade biológica.

Não existe uma pressão para a produção de organismos mais complexos ou mais “perfeitos”, como muitos acreditam. Os mais complexos não parecem ser mais vantajosos do ponto de vista da sobrevivência que os mais simples. Se isso fosse verdade, existiriam muito mais organismos complexos do que simples, ao contrário do que se observa na natureza. Essa idéia de evolução como aperfeiçoamento é pregada pelos criacionistas, segundo os quais a natureza segue um plano inteligente (*intelligent design*). Eles a aplicam não só para a evolução biológica, mas também para todos os fenômenos naturais. Ela se traduz simplesmente na crença de que as forças naturais não seriam capazes de criar “ordem” e “beleza” se não forem guiadas por uma inteligência exterior à própria matéria. Adotar esse ponto de vista é dar à ciência um mero papel de desvendar qual é esse plano subjacente à natureza que já está preestabelecido para todo o sempre. Esse determinismo foi abandonado pela Mecânica Quântica há quase um século.

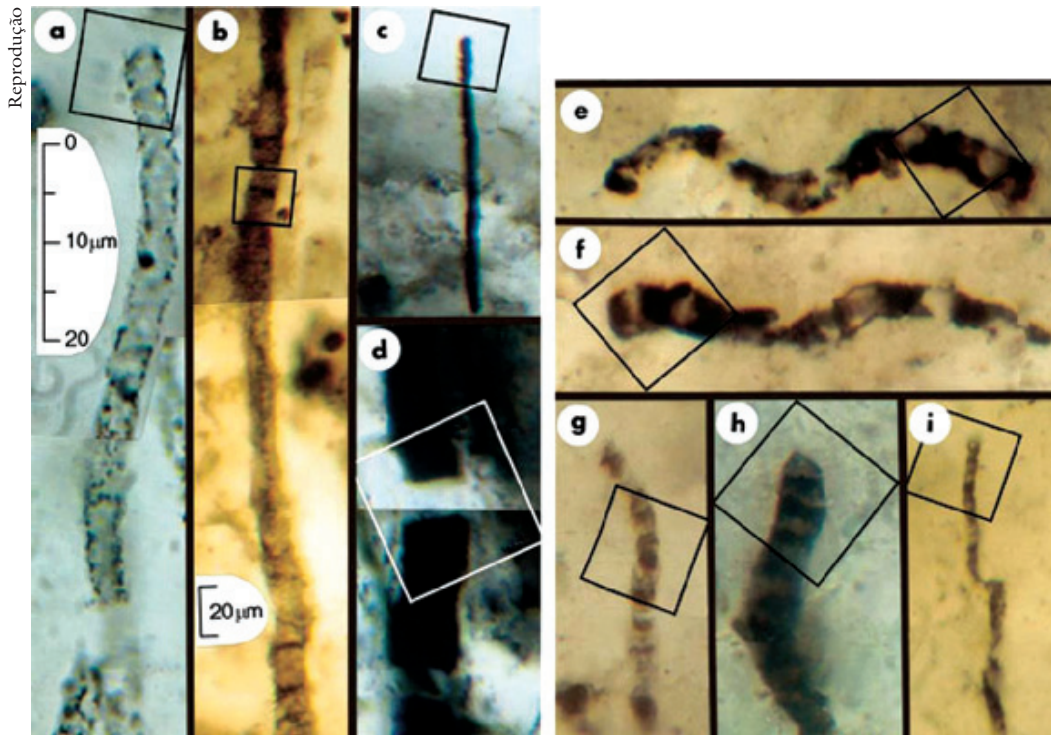


Figura 3 – Microfósseis pré-Cambrianos. Os exemplares “e, f, g, h, i” são os mais antigos (3,465 B.a.), encontrados nos estromatólitos de Apex, na Austrália (J. W. Schopf et al. *Nature*, 416, 73, 2002).

A árvore universal da vida

Atrás de sua enorme diversidade de formas, cores e tamanhos, os organismos atuais mostram características muito similares que servem de parâmetros importantes para entender sua origem. Por exemplo, a água é a substância (molécula) mais abundante da matéria viva: 70% do corpo humano, 95% da alface, 75% de uma bactéria. Todos os seres têm uma alta porcentagem de água, o que favorece a hipótese de uma origem em meio aquoso. Sua composição atômica também é admiravelmente simples. Apenas quatro elementos químicos – carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (CHON) – somam 99,9% da matéria viva. Eles estão entre os cinco mais abundantes do Universo, só deixando de fora o hélio, que não faz ligações químicas. A bioquímica da vida é composta por combinações desses átomos, formando água (H_2O), metano (CH_4), amônia (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), açúcares, proteínas, ácidos graxos e outros. Mesmo que muitas proteínas tenham elementos metálicos e requeiram certos íons para funcionar, os elementos mais abundantes são, de longe, os mencionados anteriormente. O fato de que a vida se compõe dos átomos mais amplamente encontrados na natureza indica que ela é simplesmente uma expressão da oportunidade e não uma excepcionalidade, um milagre, que poderia ser feito com materiais arbitrários, inclusive raros.

Tabela 1 – Abundância de elementos químicos (em % de massa)

Elemento	Bactérias	Mamíferos	Cometas	Sol /Estrelas
Hidrogênio	63	61	56	73,4
Oxigênio	29	26	31	0,8
Carbono	6,4	10,5	10	0,2
Nitrogênio	1,4	2,4	2,7	0,09
Enxofre	0,06	0,13	0,3	0,05
Fósforo	0,12	0,13	0,08	0,0007

Embora bactérias, baleias, palmeiras e elefantes sejam tão diferentes entre si na forma, eles são extremamente parecidos na química. As moléculas simples se combinam formando moléculas maiores – os monômeros,² como os nucleotídeos e os aminoácidos. Os nucleotídeos e aminoácidos usados pelos seres vivos são em pequeno número e praticamente os mesmos. A junção desses monômeros em grandes cadeias forma os biopolímeros: os ácidos nucleicos (RNA e DNA) e as proteínas. São eles que estão por trás da diversidade biológica que observamos. Nos seres vivos atuais, o DNA carrega o código de montagem das proteínas que são responsáveis pelas mais diversas funções. Além da composição material, a forma de processamento de energia (metabolismo) também é muito parecida em todos os organismos vivos, ocorrendo por um pequeno número de processos intimamente relacionados. A Figura 4 indica TODOS os seres vivos como parentes e apresentando uma origem comum.

Uma forma poderosa de diagnosticar o parentesco dos seres vivos é pela análise genômica³ do RNA ribossômico 16s, que não pode ser aplicada a fósseis, pois esses perderam seu conteúdo celular. Os ribossomos são complexos moleculares do interior das células que participam da produção de proteínas. Essas fábricas de proteínas são compostas de vários tipos de ácido ribonucleico (RNA). Mutações, ao longo do tempo, alteram a ordem das bases no RNA ribossômico (RNAr). Organismos que fazem parte de um grupo biológico que compartilha uma história recente têm RNAr semelhante, e quanto mais afastado for o parentesco, mais esse se diferencia. A comparação do RNAr 16s entre dois grupos que se originaram de um mesmo ramo evolutivo permite avaliar quantas mudanças ocorreram desde a separação. Isso possibilita a construção de uma árvore em que o comprimento do ramo é proporcional ao número de mudanças sofridas, chamada de árvore filogenética universal.

Nota-se que, embora as plantas e animais sejam as formas mais familiares de vida para nós, elas perfazem somente dois dos vinte ramos da árvore da vida. Além desses dois, somente os fungos têm membros visíveis sem a ajuda de um microscópio. A maior parte da vida é invisível a olho nu. Todos os organismos conhecidos pertencem a um dos três domínios: *bacteria* (ou eubactérias), *archaea* (ou arqueobactérias) e *eucarya* (ou eucariotos). Todos os ramos se unem a um

ramo único numa região entre *bacteria* e *archaea*. Esse ramo teria sido o do último ancestral comum (denominado progenota).

A árvore filogenética concorda bem com o estudo dos fósseis, que mostra que os mais antigos eram do domínio *bacteria* e *archaea*, e os mais recentes, do *eucarya*. Ela poderia ser lida como uma seqüência temporal, em que o tempo presente estaria na ponta dos ramos e o passado na direção de sua conexão com outro ramo. Entretanto, os tempos de divisão dos ramos não podem ser medidos com precisão, pois as taxas de mutação não são regulares com o tempo. Um outro aspecto da árvore universal é que ela se baseia nos seres que estão vivos hoje, que somam menos de 1% de todas as espécies que se sucederam na longa história do planeta.

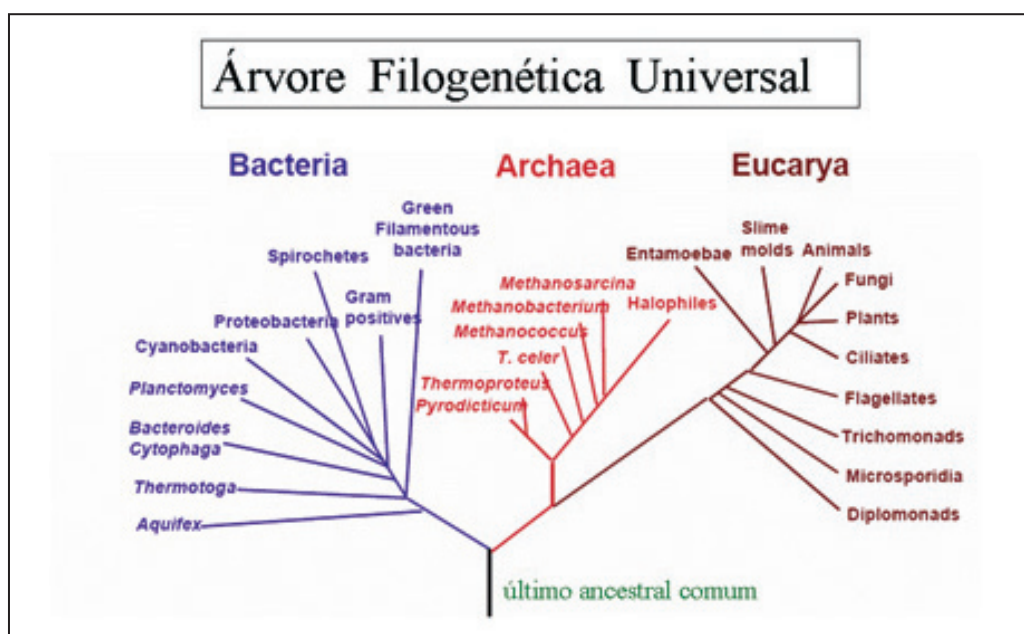


Figura 4 – Árvore filogenética universal da vida baseada no RNA ribossômico 16s, mostrando a existência de um ancestral comum a todas as formas de vida.

A formação da árvore filogenética parece não ter sido tão simples e linear como aqui apresentada. Nos eucariotos, as mitocôndrias (responsáveis pela respiração) e os cloroplastos (responsáveis pela fotossíntese) parecem ter se originado de bactérias que invadiram o interior de células se instalando numa associação simbiótica.⁴ Da mesma forma, organismos primitivos podem ter se associado “horizontalmente” trocando material genético. Assim, em vez de um único tronco, a árvore filogenética pode ter se originado de diversos troncos separados, que acabaram se unindo em três grandes ramos, que depois se subdividiram em ramos secundários. Apesar disso, vamos continuar a falar do ancestral comum, independentemente de ele ter aparecido como um único tipo de organismo ou de ter sido o resultado de uma aglutinação de linhagens diferentes.

O progenota (último ancestral comum)

O último ancestral comum deve ter tido características que são compartilhadas por todos os seres vivos: reprodução por meio de genes (DNA), fábricas de proteínas (ribossomo e RNA), mecanismos para reparar erros no código, obter e armazenar energia. Ele deve ter sido mais parecido com os organismos mais primitivos (ramos mais baixos da árvore universal) do que com os mais modernos (pontas dos ramos). Os organismos dos ramos mais baixos são tolerantes ao calor, os termófilos e hipertermófilos. Eles vivem em temperaturas parecidas com a da água fervente (90-113°C), como as encontradas nas fontes hidrotermais do fundo dos oceanos e nas poças vulcânicas como as do Parque Yellowstone (Estados Unidos). Entretanto, existem técnicas que permitem avaliar a temperatura de formação de bases nitrogenadas, e elas indicam que os organismos primitivos teriam se originado em ambientes de temperatura moderada e não extrema. Outro fato que vai contra a origem da vida em alta temperatura é o efeito desagregador que ela tem para o RNA, açúcares e alguns aminoácidos. A 100°C a meia-vida de diversos compostos é de segundos a horas. Assim, os hipertermófilos teriam se adaptado às altas temperaturas e não se formado nelas. Isso, somado à maquinaria complexa que esses já apresentam, indica que eles não poderiam ter sido a primeira forma de vida.

Na primeira metade do século passado, imaginava-se que a vida já teria se iniciado fabricando seu próprio alimento (autotrofismo⁵) como fazem hoje os seres fotossintetizantes. Na fotossíntese, por exemplo, o CO₂ atmosférico é absorvido pela célula, e, sob a ação da luz e com a utilização de água, gera uma série de compostos orgânicos, em especial açúcares como a glicose. Numa etapa seguinte, eles são usados para gerar energia e fabricar componentes estruturais (corpo). Os animais não geram, mas capturam energia fabricada por outros organismos (heterotrofismo⁶). Mediante a oxidação⁷ dos açúcares, percorre-se um caminho inverso ao da fotossíntese, liberando energia e devolvendo CO₂ à atmosfera. Por volta do início dos anos 1900, esses processos estavam ainda sendo entendidos e se imaginava que, sem seres autotróficos, não haveria fontes de alimento na Terra primitiva. Entretanto, o aparecimento de organismos que já nascem fabricando sua própria comida parece implausível hoje em dia.

Na década de 1920, Oparin apresentou uma idéia nova, que teve grandes desdobramentos. Ele usou um cenário de evolução darwiniana lenta e gradual, partindo do mais simples para o mais complexo. A partir dos hidrocarbonetos e da amônia, teriam se formado outros compostos mais complexos, como carboidratos e proteínas. Processos semelhantes, num ambiente redutor,⁸ foram propostos por J. B. S. Haldane (1892-1964). Depois disso, o cenário autotrófico perdeu ímpeto, mas continua a ter seus defensores até hoje.

A química pré-biótica

Os aminoácidos são fundamentais para a vida. No mundo atual eles são produzidos por intermédio das proteínas, no interior das células. Para a vida ter

surgido, eles precisariam ter sido produzidos por processos abióticos (inorgânicos). A proposta Oparin-Haldane é que os aminoácidos teriam sido produzidos a partir de moléculas carbonadas mais simples, num ambiente redutor. Nos anos 1950, Harold Urey (1893-1981) argumentou que a atmosfera da Terra, em sua origem, era parecida com a dos planetas gasosos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Eles teriam mantido suas atmosferas quase inalteradas por causa da grande massa (alta gravidade) e baixa temperatura (distantes do Sol). Os planetas rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) as teriam perdido pela baixa gravidade e pela proximidade do Sol, que teria dissociado as moléculas pela ação dos raios UV e que produz alta temperatura atmosférica. Como Júpiter e seus parceiros gasosos têm atmosfera rica em amônia (NH_3), metano (CH_4) e hidrogênio (H_2), assim também teria sido a atmosfera primitiva da Terra e dos outros planetas rochosos.

A hipótese de Urey entusiasmou seu aluno Stanley Miller. Ele conhecia a teoria de Oparin de que os aminoácidos poderiam se formar por processos abióticos numa atmosfera redutora e decidiu colocar isso à prova no laboratório. Em 1953, montou um experimento mimetizando os processos atmosféricos, em que um gás de amônia, metano e hidrogênio passava por uma câmara onde havia descargas elétricas, depois era condensado num recipiente de água e evaporado novamente, num ciclo contínuo. Em poucos dias se formou um precipitado rico em aminoácidos. Esse resultado é espetacular e abriu horizontes novos para o entendimento da origem da vida. O experimento é um cartão-postal exibido pelos professores de ciências como sendo a demonstração de que foi assim que a vida se originou na Terra, mas isso é incorreto por dois motivos.

O primeiro problema com o experimento de Miller é que a atmosfera da Terra nunca foi redutora, pelo menos no grau necessário para formar aminoácidos. As inúmeras variantes do experimento de Miller, quando realizadas em ambientes neutros (intermediário entre oxidante e redutor) ou baixamente redutores, nunca produziram quantidades relevantes de aminoácidos. A idéia de atmosferas redutoras em planetas rochosos foi demonstrada inconsistente pela planetologia por volta dos anos 1970 (ver Delsemme, 2000). Os planetas rochosos se formaram a partir de poeira seca, sem a capa de água e elementos voláteis que formaram os planetas gasosos. É por isso que os planetas rochosos têm atmosferas neutras (ricas em dióxido de carbono e nitrogênio), e os gasosos têm atmosferas redutoras (ricas em hidrogênio, amônia e metano). O segundo problema é que os experimentos nunca produziram vida ou qualquer coisa mais complexa que aminoácidos.

Como se explica então o fato de que a Terra e outros planetas rochosos tenham água hoje (embora pouca em comparação com os corpos mais distantes do Sol)? Os fragmentos que restaram da formação de Júpiter e dos outros planetas gasosos foram lançados para todos os lados, em forma de cometas, e muitos deles atingiram a Terra trazendo grande quantidade de água e compostos carbonados. A formação da Lua (4,42 B.a.) pela colisão com um planetóide do tamanho de

Marte com a Terra cozinhou a crosta terrestre e vaporizou os oceanos trazidos pelos cometas. Novas quedas de cometas e meteoritos trouxeram mais água e compostos carbonados. O calor dos impactos, o efeito estufa da luz solar na atmosfera rica em CO_2 e a dissociação das moléculas hidrogenadas pela radiação UV não deixam muito espaço para uma atmosfera redutora (rica em hidrogênio).

A descoberta das fontes hidrotermais submarinas trouxe uma nova esperança de encontrar esse ambiente redutor. Esses locais são interessantes por serem abrigados contra a queda de meteoróides e cometas, por exalarem compostos de interesse para a química pré-biótica (H_2S , CO e CO_2) e pela fonte de energia térmica (temperaturas de até 350°C). Se eles exalassessem também HCN , CH_4 e NH_3 , formariam um ambiente redutor e possivelmente alguns tipos de aminoácidos, embora não todos os necessários para a vida, por causa do efeito desagregador das altas temperaturas sobre alguns deles.

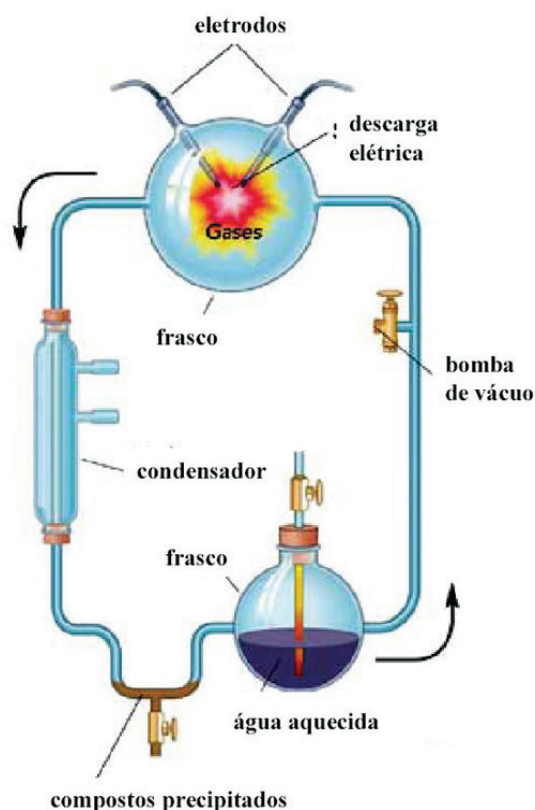


Figura 5 – Experimento de S. Miller para síntese abiótica (inorgânica) de aminoácidos em uma atmosfera redutora, que Urey supunha ter existido na Terra primitiva.

Enquanto é difícil encontrar um ambiente favorável à formação de aminoácidos na Terra primitiva, o experimento de Miller se mostra amplamente operativo fora dela. Alguns meteoritos (do tipo condrito), como o que caiu

em Murchison na Austrália em 1969, contêm boa quantidade de aminoácidos (100 ppm – partes por milhão), e eles são dos mesmos tipos dos produzidos no experimento de Miller. Isso não é de estranhar, dado que esses corpos se formaram na região dos planetas gasosos, onde o disco protoplanetário era rico em hidrogênio. Os cometas são ricos em compostos orgânicos (50% H₂O, 1% HCN, 1% H₂CO₃, além de CO, CO₂ e aminoácidos) e poderiam ter trazido boa quantidade de aminoácidos nas últimas fases de formação da Terra. Os fragmentos pequenos, especialmente a poeira cometária, não geram muito calor ao caírem, de modo que os aminoácidos podem ter sobrevivido à queda. Atualmente, caem ~40 mil toneladas/ano de poeira cometária e o fluxo deve ter sido 100-1.000 vezes mais elevado nos primórdios da Terra. A questão ainda difícil de responder é se o aporte de aminoácidos de fora da Terra teria sido suficiente para a origem da vida aqui.



Figura 6 – Os cometas trouxeram água, compostos biogênicos e voláteis da região dos planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) para os planetas rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) quando o sistema solar atingiu a idade de ~70 M.a. (ESO)

A formação de aminoácidos é surpreendentemente fácil nos ambientes típicos do Universo, ricos em hidrogênio molecular. Tanto que três tipos de aminoácidos simples foram detectados em nuvens interestelares como a nebulosa de Orion. Aminoácidos mais complexos são muito difíceis de ser identificados, mas podem estar presentes dada a enorme variedade de moléculas complexas existentes nas nuvens interestelares.

Não se encontrou até agora um mecanismo ou ambiente que desse conta de produzir toda a variedade de compostos orgânicos necessários para a vida. É possível que a sopa pré-biótica tenha tido contribuições de diferentes processos ocorridos no ambiente interplanetário, na atmosfera terrestre e nas fontes hidrotermais. Embora o problema de saber quanto cada fonte contribuiu para a sopa pré-biótica continue em aberto, a origem abiótica de compostos orgânicos essenciais para a vida, como os aminoácidos, está firmemente embasada em experimentos de laboratório e processos teóricos.

A origem do código genético

A origem do código genético talvez seja o passo mais desafiador para se entender a origem da vida. O aparecimento de um *script* de reprodução corresponde ao aparecimento de um *software*, ou uma memória natural. Que mecanismo tem essa capacidade? A passagem do inorgânico para a vida inicia-se num meio disperso e encontra seu foco dentro do ambiente celular. A montagem de moléculas menores numa estrutura maior deve ter se dado num ambiente de competição e seleção. Não parece que essa montagem tenha se dado simplesmente por processos aleatórios, senão deveríamos ter uma série ininterrupta de moléculas, formando uma pirâmide com as moléculas simples em grande número, formando a base e diminuindo em número à medida que aumenta o tamanho. A molécula do DNA tem bilhões de átomos, um número imensamente maior que as outras moléculas orgânicas menores. Esse salto de continuidade sugere que a molécula de DNA tenha se formado por um processo específico, coordenando um grande número de elementos simultaneamente.

O desenvolvimento e a reprodução dos organismos atuais se dão por intermédio de um código genético universal (constituído sobre ácidos nucleicos) que contém as informações sobre as seqüências de aminoácidos que constituem as proteínas. Os ácidos nucleicos são a base da replicação e as proteínas, a do metabolismo. *Grosso modo*, o processo de síntese protéica se baseia na transcrição das informações do DNA para o RNA mensageiro e na tradução em proteínas. Por sua vez, as proteínas controlam a catálise e a replicação do DNA. Esse processo é tão complexo que teria que ter passado por estágios mais simples em fases anteriores. Como ele teria se iniciado? Parafraçando o paradoxo do ovo e da galinha, surge a pergunta: quem surgiu primeiro, o código genético ou o metabolismo? Existem defensores das duas possibilidades. Há uma hipótese de que o RNA teria sido a primeira molécula ativa na origem da vida chamada de *mundo de RNA*. Entretanto, o RNA também é tão complexo que existe a hipótese de um mundo pré-RNA, mas a bioquímica que conhecemos não nos dá pistas sobre a química primordial e teríamos que investigar novos panoramas. Ainda não é claro que tipo de molécula pode ter formado o primeiro material genético, e as etapas que podem ter levado a um mundo de RNA ainda são nebulosas.

A segunda vertente admite que o metabolismo pode ter vindo antes do código genético. A idéia geral desse ponto de vista é que é possível que haja or-

ganização considerável na própria seqüência de reações químicas, sem que haja um código genético. Essa perspectiva, porém, ainda carece de evidências experimentais, já que parece improvável que polímeros longos e reações complexas possam se organizar de forma autônoma. Alguns autores acham possível que exista um princípio de auto-organização que opere nesse sentido.

Quando ocorreu a origem da vida?

É comum as pessoas pensarem que algo tão complexo quanto a vida exigiria processos que só ocorrem raramente, demandando tempos extremamente longos para terem alguma chance de ocorrer. Os dados atuais indicam que isso não é verdade. Vamos olhar para as primeiras eras geológicas da Terra. A formação rochosa Isua (na Groenlândia) é uma das mais antigas, tem 3,8 B.a. Embora não contenha organismos fósseis, ela tem indicações de contaminação por atividade biológica. O grafite encontrado nela tem um teor de ^{13}C (variedade de átomo de carbono com seis prótons e sete nêutrons) em relação ao isótopo mais leve ^{12}C com valores típicos de material orgânico, como o encontrado em restos vegetais atuais. Até agora, não se encontrou outra explicação, a não ser a fotossíntese para explicar essa anomalia do carbono.

Outro dado que aponta para a fotossíntese em épocas remotas são os imensos depósitos de óxido de ferro (chamados de *banded iron formation* – BIF), os mais antigos com ~3,7 B.a. de idade. Nessa época, não existia oxigênio livre na atmosfera, como indicado pela existência de pirita e uraninita. O oxigênio pode ter sido liberado nos oceanos pela atividade de algas fotossintetizantes e consumido localmente, oxidando o ferro. Se as rochas de Isua e os BIF mais antigos indicam existência de vida, ela deve ter surgido antes de 3,8 B.a., dado que a fotossíntese, por ser um processo muito complexo, não deve ter sido a primeira forma de produção de energia. O ancestral comum deve ter surgido antes disso.

Mais um motivo para recuar o aparecimento do progenota para antes de 3,8 B.a. é que os trezentos milhões de anos seguintes parecem ser muito curtos para a vida ter atingido o nível de complexidade da cianobactéria, parente dos organismos que formaram os estromatólitos. Mas não podemos recuar a origem da vida para tempos muito anteriores a esse. A Terra se formou há 4,56 B.a., e há 4,46 B.a. já tinha crosta sólida, a água tinha chovido das nuvens para formar os oceanos e a atmosfera tinha temperatura aceitável. Mas nos primeiros ~700 milhões de anos ela era castigada por uma densa chuva meteorítica, alguns dos fragmentos com centenas de quilômetros de tamanho. Uma colisão dessas vaporizaria os oceanos e aqueceria tanto a atmosfera, que levaria mais de mil anos para chover de novo. Se já existia vida na Terra nessa época, ela teria sido destruída, não uma, mas muitas vezes. Ela só poderia ter se arraigado de forma estável depois do fim da chuva de meteoros esterilizantes, ou seja, há menos de 3,9 B.a. Isso deixa uma janela de <100 milhões de anos para a vida partir do zero e atingir o estágio de produção de energia por fotossíntese. Se preferirmos descartar

o diferencial de ^{13}C ou os BIF como indício de vida, o intervalo de tempo para a vida ter se formado e evoluído até o nível de complexidade da cianobactéria sobe para meros 400 M.a. Nos 3,5 B.a. seguintes a vida aumentou sua diversidade, mas não aconteceram saltos de complexidade tão grandes quanto o inicial, do inorgânico para o vivo. Por isso, a janela de tempo de centenas de milhões de anos é pequena e indica que esse salto não é tão difícil ou improvável para a natureza.

A janela para a origem da vida, se ela se iniciou na Terra, pode ser bem mais curta do que os quatrocentos milhões de anos indicados antes. Uma escala de tempo muito curta poderia ser obtida do fato que as reações químicas que produzem as grandes moléculas (polímeros) são reversíveis. Em escalas de dias a meses, a maioria delas reverteria para componentes mais simples, em meio aquoso. Isso poderia ser evitado se as grandes moléculas fossem retiradas do meio líquido, logo que formadas. Esse cenário funcionaria se a vida tivesse surgido nas plataformas continentais e não no fundo dos oceanos. No início, as placas litoféricas⁹ ainda estavam submersas, e as indicações mais fortes são de que a vida tenha surgido no fundo dos oceanos. Outra forma de evitar a reversibilidade seria encerrar as macromoléculas em membranas, como as paredes celulares. Naquele tempo não havia células como as atuais, mas é possível que houvesse membranas formadas por processos inorgânicos. Oparin sugeriu que coacervados,¹⁰ formados espontaneamente por polímeros em solução aquosa, tenham constituído a membrana de uma protocélula. Embora eles realmente se formem em laboratório, são muito instáveis. Outros tipos de formação de membranas são possíveis; por exemplo, os proteinóides¹¹ que Sidney Fox sintetizou em laboratório.

Mesmo depois de escapar da reversibilidade, os componentes da vida primitiva encontrariam outras armadilhas fatais. Uma delas são as fontes hidrotermais que existem no fundo dos oceanos. Elas reciclam um volume igual ao dos oceanos atuais em dez milhões de anos. Entretanto, quando o interior da Terra era mais quente, esse processo era muito mais forte e os tempos de reciclagem eram muito mais curtos. A água sai das fontes hidrotermais com $T > 350^\circ\text{C}$, sendo totalmente esterilizada.

Quanto menor a escala de tempo, mais simples deve ter sido o processo de origem da vida. Na Terra, ela se instalou tão cedo e tão rapidamente que parece ser um mero subproduto da formação planetária. Isso abre enormes perspectivas de que ela também tenha surgido em outros planetas, que só na nossa galáxia devem ultrapassar a casa dos trilhões. No volume visível do Universo existem cerca de cem bilhões de galáxias como a nossa, elevando o número de planetas para mais de 10^{23} . O fato de que a origem da vida seja um assunto tão difícil de ser compreendido não nos deve induzir ao erro de assumir que também seja difícil de ser realizada pela natureza. A janela para a formação de vida na Terra é tão estreita, que alguns preferem acreditar que ela tenha aportado aqui já pronta (hipótese de panspermia). O conforto que se ganha aumentando a janela de

tempo para dez bilhões de anos e multiplicando a diversidade de situações físicas e químicas por um número incontável de planetas se perde pelo imenso isolamento cósmico dos astros e pela exigüidade de mecanismos viáveis de transporte de seres vivos de um para outro. O transporte só é viável para planetas próximos, como entre a Terra e Marte. O problema do mecanismo de origem se transfere daqui para outro planeta, mas sua solução não se torna mais fácil.

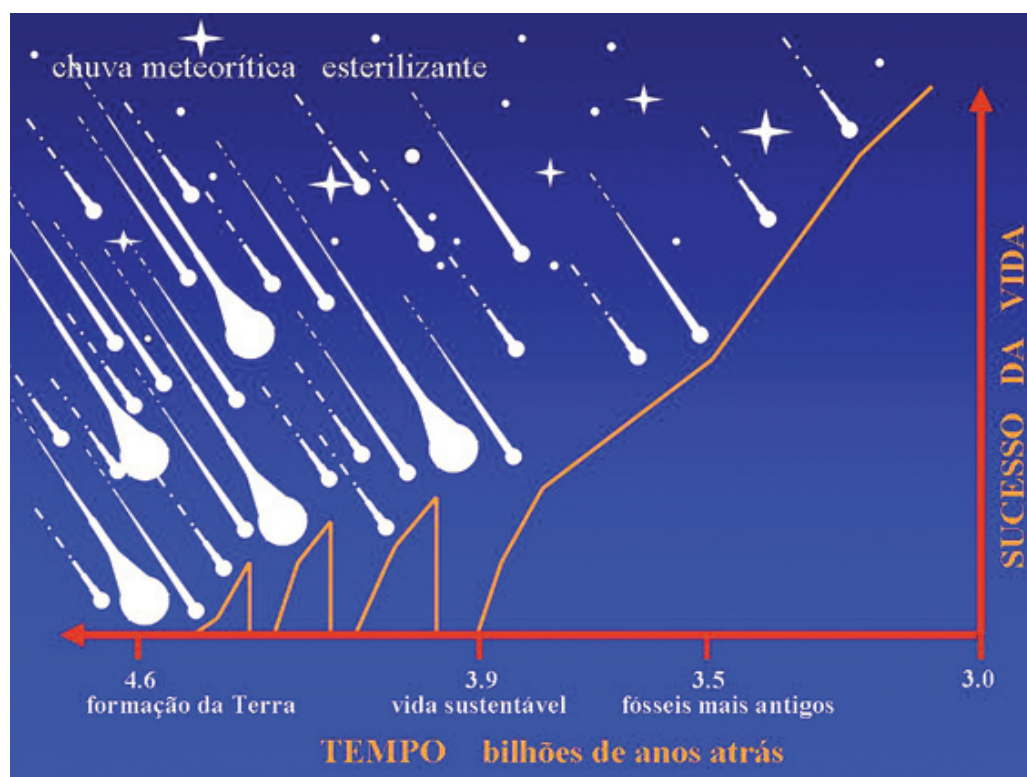


Figura 7 – Estabelecimento da vida na Terra após ~700 milhões de anos de idade, quando findou a chuva meteorítica esterilizante.

Perspectivas de vida fora da Terra

O estudo da vida no contexto astronômico é relevante por diversos motivos. O mais fundamental deles é que nunca poderemos ter uma teoria geral da vida enquanto conhecermos só o exemplar terrestre. Tomemos a física como paradigma, ela tem teorias gerais porque existem inúmeras situações em que podem ser aplicadas e se verificar como cada parâmetro varia de uma situação para outra. A multiplicidade de situações permite fazer previsões e passar a teoria pelo crivo do teste empírico. Só a descoberta de outros exemplares de vida, formados fora da Terra, permitirá ver o que é fundamental e o que é secundário no fenômeno. Outro motivo é que as informações sobre as condições físicas e químicas da Terra, no momento em que a vida aqui se estabeleceu, estão perdidas para sempre. A observação de outros astros permite rever o passado, pois tudo o que

vemos no espaço são acontecimentos que se deram no passado, quanto mais distante no espaço, mais longe no tempo. A luz atravessa o espaço e, de modo análogo à rocha que atravessa o tempo, traz registros fósseis. No espaço existem inúmeros planetas em diversos estágios de formação que permitem rever as etapas evolutivas por que a Terra passou, como se fosse uma viagem no tempo. Outro motivo para olhar para o céu é simplesmente testar o pressuposto básico do evolucionismo que assume que a vida é um fato natural, surgindo como parte dos processos de transformação da matéria e dissipação de energia. Qualquer outro planeta em condições físicas iguais à da Terra teria tido a mesma chance de gerar vida.

Até agora, o único empreendimento de procura de vida fora da Terra foi por meio da escuta de sinais de rádio que poderiam ter sido enviados por civilizações extraterrestres. Embora tenhamos simpatia por qualquer esforço metódico, esses projetos acabaram sendo excluídos da pauta dos financiamentos governamentais por motivos justos. Em primeiro lugar, não existe uma teoria testável sobre a probabilidade de a evolução ter produzido seres comunicantes como nós em outros lugares, ou sobre a decisão deles de aplicar recursos para avisar a todo o Universo que existem, ou sobre a inevitabilidade de que a comunicação seja feita através de ondas de rádio, ou ainda sobre quanto tempo uma civilização tecnológica que demanda tantos recursos pode sobreviver sem se autodestruir. Em segundo lugar, está o *modus operandi* da produção científica atual. O número de variáveis envolvidas na escuta de rádio é tão grande que é impossível oferecer aos órgãos financiadores uma expectativa de escala de tempo para que sejam obtidos resultados. Para qual estrela apontar, por quanto tempo manter a escuta, em que frequências monitorar os sinais, que tipo de sinais são produtos de linguagem e quais são emissões naturais? Quantos estudantes se convenceriam em devotar suas vidas a um projeto que eventualmente levaria milênios para dar resultado, recebendo bolsas por no máximo quatro anos?

Os projetos atuais de busca de vida seguem uma linha científica clássica. Eles são tão consistentes e capturaram a imaginação do contribuinte de tal modo que os recursos já permitem um avanço vigoroso. Esse certamente será um dos grandes temas do século XXI. Os resultados são esperados para uma escala de tempo de uma ou duas décadas e poderemos estar vivos para vê-los. O que vai se procurar? Simplesmente a vida na forma mais comum que conhecemos na Terra e que tem habitado nosso planeta por mais tempo: microorganismos. Não seria falta de imaginação restringir a busca ao trivial que conhecemos? A restrição tem excelentes motivos. Primeiro, não adianta procurar algo que não se sabe como identificar. Segundo, os microorganismos contaminam as atmosferas planetárias com moléculas facilmente identificáveis a grandes distâncias, como o ozônio (O₃), por exemplo. Uma atmosfera com camada de ozônio é impensável sem uma atividade fotossintética em grande escala. O oxigênio, por sua alta reatividade química, está firmemente preso em moléculas e, para ser liberado, precisa de um agente que vá no sentido contrário do potencial químico. Isso indica que

existe um processo que atua contra o equilíbrio termodinâmico (localmente), o que é uma das características da vida. Além disso, o ozônio é decomposto pela luz ultravioleta do Sol, e a manutenção de uma camada na atmosfera implica uma constante reposição de oxigênio livre, o que indicaria continuidade da fonte, ou seja, reprodução – outra característica da vida. O metano, em planetas rochosos, funciona exatamente como o ozônio, mas indicando atividade heterotrófica, em vez de autotrófica. Na Terra, as capas de metano são produzidas por bactérias anaeróbicas em aterros sanitários, no intestino de animais ou no material orgânico em decomposição nos pântanos. No caso de planetas gasosos, o metano é de origem abiótica e sua presença não é um indicador de atividade biológica.

Em terceiro lugar, a vida, como a conhecemos, parece ter altíssima probabilidade de existir. Não só ela apareceu na Terra logo no início, mas manteve-se em expansão mesmo sob a ação de catástrofes globais como vulcanismo, congelamento, queda de grandes meteoritos. A vida está mais para uma praga invasora e resistente do que algo improvável e delicado. Os elementos químicos que ela requer estão entre os mais abundantes do Universo; e, quando ele atingiu dois bilhões de anos de idade (~12 B.a. atrás), a tabela periódica já tinha elementos em todas as suas casas. Nessa época, já havia enorme quantidade de água, e moléculas complexas podiam começar a se formar, como se observa nas nuvens interestelares. A formação dos planetas segue a das estrelas, pois são parte do mesmo processo. O auge de formação estelar foi atingido há ~10 B.a, de modo que os planetas típicos são velhos. Isso não implica dizer que a vida está pululando em todos os cantos da Galáxia, mas que a vida como a conhecemos tem boas chances de existir e de ser encontrada por meio de contaminações nas atmosferas planetárias.

A procura de vida microscópica no sistema solar foi feita de modo muito limitado em Marte. O interesse em Marte é porque está relativamente próximo e porque apresentou condições favoráveis à vida em seu início. Ele teve oceanos rasos ao longo de centenas de milhões de anos, os impactos meteoríticos lá foram menos brutais que na Terra, dada sua gravidade menor, e as temperaturas atmosféricas parecem ter sido mais amenas que aqui. Tudo somado, Marte apresenta um fator favorável ao aparecimento de vida maior que a Terra e numa janela de tempo mais longa. O fato de que o planeta congelou há mais de 3,5 bilhões de anos indica que, se a vida existiu lá, ela foi interrompida logo no início, a menos que tenha sido transplantada para cá a bordo dos incontáveis meteoritos (40 bilhões de toneladas) que aqui aportaram. Se encontrarmos vida lá do mesmo tipo que a da Terra, isso não vai se constituir num segundo ponto de apoio para a generalização da teoria da vida. Não poderemos excluir a possibilidade de que somos marcianos ou eles são terráqueos, dado que a probabilidade de contaminação nas duas direções não é desprezível.

A Lua de Júpiter, Europa, tem atrativos por ter um mar de água líquida com fontes hidrotermais (debaixo de numa capa de gelo), numa situação não muito diferente da que se imagina hoje para o início de vida na Terra. Sua van-

tagem em relação a Marte é a baixíssima probabilidade de contaminação a partir da Terra. Mas fazer um furo de dezenas de quilômetros de profundidade na capa de gelo de Europa e procurar micróbios num volume de água maior que o dos oceanos da Terra é um empreendimento economicamente inviável na atualidade. Não existem outros lugares no sistema solar que ofereçam perspectivas tão boas quanto Marte e Europa para a vida ter surgido.

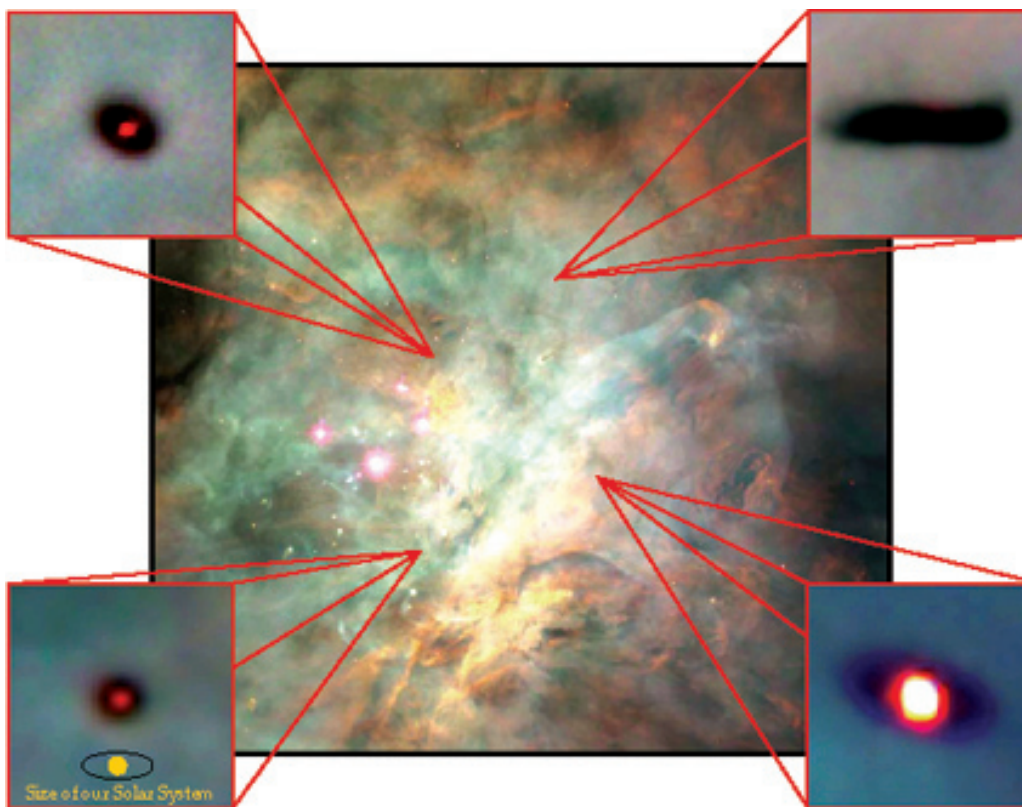


Figura 8 – Sistemas planetários em formação na Nebulosa de Orion, mostrando discos de poeira protoplanetária (machas escuras). Eles permitem rever como se deu a formação do sistema solar. (Nasa)

De qualquer modo, o sistema solar é um pouco irrelevante para uma teoria geral da vida, dado que precisamos de uma abundância de exemplos diferentes. Para vasculhar um grande número de planetas, temos que olhar para as estrelas, em torno das quais devem existir trilhões, só na nossa galáxia. Os instrumentos atuais só conseguem detectar planetas de modo indireto, por meio da reação gravitacional da estrela hospedeira, e isso se limita a casos atípicos (planetas muito grandes e bem próximos da estrela central). Mesmo assim, já se conhecem mais de 150 planetas extra-solares. Todos são desinteressantes para a vida, pois trata-se de gigantes gasosos que reciclam suas atmosferas entre temperaturas de milhares de graus no interior a -180°C , no topo das nuvens.

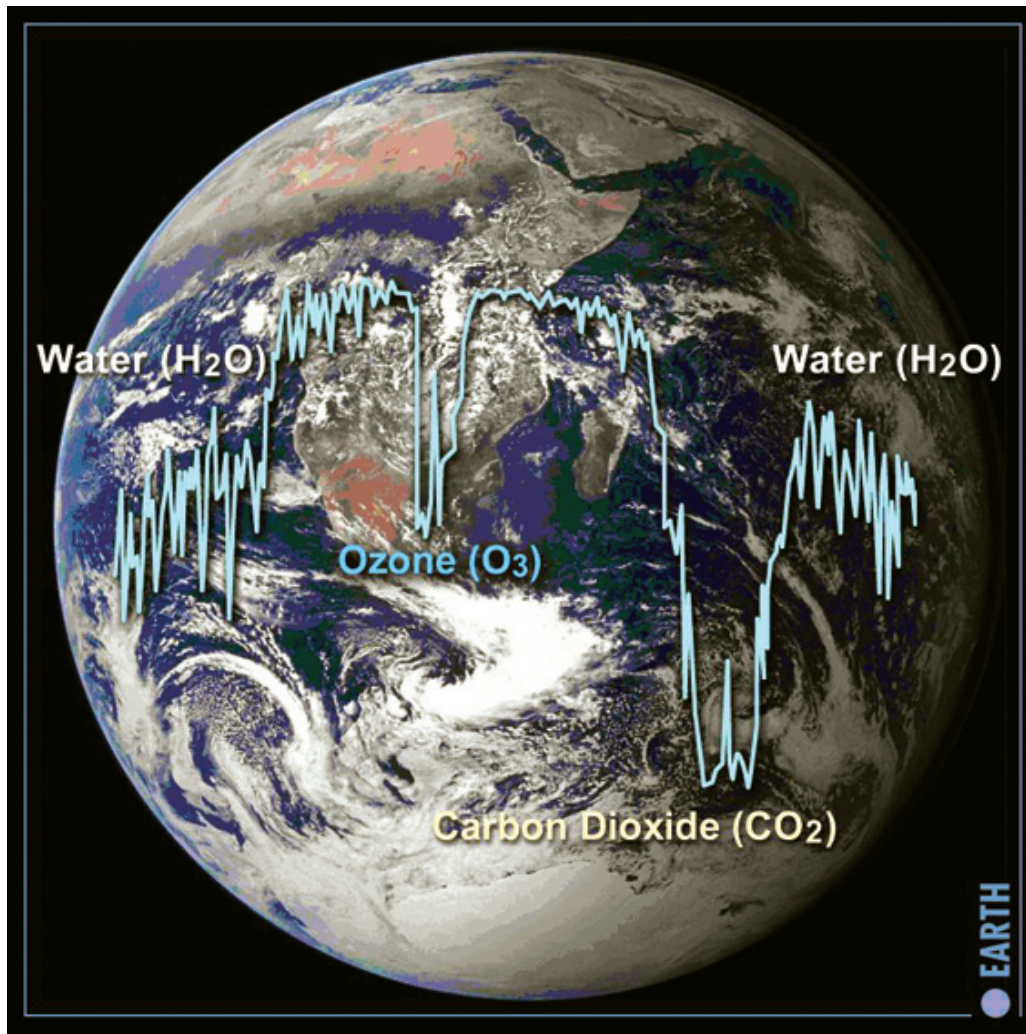


Figura 9 – Espectro da Terra no infravermelho médio, tomado a partir do espaço, mostrando uma banda molecular do ozônio na atmosfera. Esse sinal é considerado inequívoco de atividade biológica (fotossíntese). (Projeto Darwin - ESA)

O Santo Graal da procura da vida está escondido nos planetas rochosos como o nosso. Outra falta de imaginação? Talvez. Por um lado, ainda não nos libertamos da imagem da Mãe Terra, tão acolhedora para a vida. Mas, por outro, está o fato de que a contaminação por produtos da atividade biológica é facilmente visível nas tênues atmosferas dos planetas rochosos, por serem muito rarefeitas. Os telescópios atuais estão muito aquém da acuidade necessária para fotografar planetas rochosos em torno de outras estrelas. Mas isso é uma mera questão técnica, que se resolve com investimentos humanos e financeiros. Os recursos financeiros estão aparecendo. Será necessário aumentar o poder resolvente dos telescópios por um fator mil (o salto foi de um fator ~10 nesses quatrocentos anos desde Galileu). Depois, devemos peneirar os fótons da luz

provenientes do planeta, pois, a cada um bilhão de fótons da estrela hospedeira, entram no telescópio apenas alguns poucos do planeta. Será preciso apagar a estrela, sem interferir na luz do planetinha situado a frações de segundos de arco¹² dela. Os instrumentos para isso já estão em desenvolvimento, e as primeiras detecções diretas devem acontecer em menos de duas décadas. Aí bastará passar a luz dos planetas rochosos pelo espectrógrafo e procurar a assinatura do ozônio e do metano.

Nesse meio tempo, novas gerações de pesquisadores ligados a esses projetos poderão descobrir outros sinais mais característicos de contaminação biológica diferentes dos aqui apresentados. Depois de passar pelo crivo uma extensa lista de planetas, poderemos ter estatística suficiente para saber se o Universo é tão biófilo quanto nos parece hoje. É possível que não encontremos nenhum sinal de vida (para o grande deleite dos criacionistas contrários à teoria evolutiva), mas o progresso científico só tem como escolha produzir testes que possam contradizer as premissas teóricas. Se existirem detecções positivas, aí será o início do estudo de cada tipo particular de vida, e seria ficção especular quais vão ser as técnicas empregadas para isso. Assim, uma teoria geral da vida não é esperada para tão cedo, mas se há uma coisa clara é que o avanço tecnológico e científico sempre superou as expectativas e chegou antes do que se esperava.

Notas

- 1 Estromatólito: formação rochosa de carbonato de cálcio, depositada a partir de algas mortas nas águas rasas dos oceanos.
- 2 Monômeros: subunidades moleculares que, acopladas, formam longas cadeias, chamadas polímeros.
- 3 Análise genômica: mapeamento da seqüência de pares de bases nitrogenadas (AG – adenina e guanina; CT – citosina e timina) que forma o DNA de um dado organismo.
- 4 Associação simbiótica: quando dois seres se associam com vantagens mútuas. Por exemplo, a mitocôndria gera energia para a célula e ela lhe oferece proteção e alimento.
- 5 Autotrofismo: quando um organismo produz seu próprio alimento, como no caso das plantas.
- 6 Heterotrofismo: quando um organismo se alimenta da energia gerada por outros, como no nosso caso.
- 7 Substância oxidante: aquela que recebe elétrons, como as ricas em oxigênio. Exemplos de oxidação: enferrujamento, respiração.
- 8 Substância redutora: aquela que doa elétrons, como as ricas em hidrogênio.
- 9 Placas litosféricas: são as camadas superficiais da Terra que formam os continentes. Elas são formadas de placas que se chocam com outras, produzindo os terremotos.
- 10 Coacervados: sistemas coloidais (estruturas fechadas) gerados em soluções de polímeros (moléculas com longas cadeias de carbono).
- 11 Proteinóides: grandes moléculas, parecidas com proteínas, formadas por aminoácidos, mas de origem abiótica.

12 Segundo de arco: medida de tamanho angular, subdivisão do grau. O olho humano só enxerga objetos maiores que ~120 segundos de arco.

Referências bibliográficas

- DELSEMME, A. Cometary Origin of the Biosphere. *Icarus*, v.146, p.313-25, 2000.
- JAKOSKY, B. *The search for life on other planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- LAZCANO, A. The Origins of Life. *Natural History*, p.36-41, Feb. 2006.
- McCLENDON, J. H. The Origin of Life. *Earth Science Reviews*, v.47, p.71-93, 1999.
- MENCK, C. F. M.; DE OLIVEIRA, M. C. *Biologia molecular e evolução*. Editor S. R. Matioli. Ribeirão Preto: Holos, 2001.
- SCHOPF, J. W. *Craddle of life*. s. l.: Princeton University Press, 1997.
- _____. (Ed.) *Life's origin*. s. l.: University of California Press, 2002.

RESUMO – Apresentamos um panorama geral das idéias sobre a origem da vida na história. Após delinear os principais temas necessários para o entendimento da origem da vida, mostramos as características básicas da vida atual e as relações entre os seres vivos que sugerem um ancestral comum. Revemos as condições químicas pré-bióticas no ambiente terrestre e fora dele. Quanto ao aparecimento da vida, confrontamos as principais vertentes sobre a precedência do código genético ou do metabolismo. Evidenciamos a curta janela de tempo para o estabelecimento da vida na Terra, indicando a facilidade de esse processo ocorrer no Universo. Finalmente, são apresentados os fundamentos dos projetos atuais de procura de vida fora de nosso planeta.

PALAVRAS-CHAVE: Vida, Origem da vida, Evolução.

ABSTRACT – We present a historical perspective about the ideas concerning the origin of life. After displaying the main topics necessary for understanding life's origin, the main characteristics of the present life forms and their relationships are shown, suggesting a common ancestor. The conditions for prebiotic chemistry in terrestrial or interplanetary environments are reviewed. We put in context the arguments about the early origin of replicators versus metabolism. The very narrow window for life settlement in the early Earth is stressed, pointing to the likelihood of life arising in other places in the Universe. Finally, we present the cornerstones of current search for life outside our planet.

KEYWORDS: Life, Origin of life, Evolution.

Augusto Daminieli é professor titular do Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG-USP).

@ – daminieli@astro.iag.usp.br

Daniel Santa Cruz Daminieli é bacharel em Biologia pela Universidade de São Paulo (USP) e pós-graduando na Universidade Estadual Paulista (Unesp) – Rio Claro.

@ – danieldaminieli@gmail.com

Recebido em 5.10.2006 e aceito em 6.11.2006.