

David Christian



# Origens

Uma grande história de tudo

Do big bang às primeiras estrelas, o nosso sistema solar, a vida na Terra, dinossauros, *Homo sapiens*, agricultura, a era do gelo, impérios, combustíveis fósseis, o pouso na Lua e a globalização. E o que nos aguarda...



COMPANHIA DAS LETRAS



# DADOS DE COPYRIGHT

---

## **SOBRE A OBRA PRESENTE:**

**A PRESENTE OBRA É DISPONIBILIZADA PELA EQUIPE LE LIVROS E SEUS DIVERSOS PARCEIROS, COM O OBJETIVO DE OFERECER CONTEÚDO PARA USO PARCIAL EM PESQUISAS E ESTUDOS ACADÊMICOS, BEM COMO O SIMPLES TESTE DA QUALIDADE DA OBRA, COM O FIM EXCLUSIVO DE COMPRA FUTURA. É EXPRESSAMENTE PROIBIDA E TOTALMENTE REPUDIÁVEL A VENDA, ALUGUEL, OU QUAISQUER USO COMERCIAL DO PRESENTE CONTEÚDO**

---

## **SOBRE A EQUIPE LE LIVROS:**

**O LE LIVROS E SEUS PARCEIROS DISPONIBILIZAM CONTEÚDO DE DOMÍNIO PÚBLICO E PROPRIEDADE INTELECTUAL DE FORMA TOTALMENTE GRATUITA, POR ACREDITAR QUE O CONHECIMENTO E A EDUCAÇÃO DEVEM SER ACESSÍVEIS E LIVRES A TODA E QUALQUER PESSOA. VOCÊ PODE ENCONTRAR MAIS OBRAS EM NOSSO SITE: LELIVROS.LOVE OU EM QUALQUER UM DOS SITES PARCEIROS APRESENTADOS NESTE LINK.**

---

**"QUANDO O MUNDO ESTIVER  
UNIDO NA BUSCA DO  
CONHECIMENTO, E NÃO MAIS  
LUTANDO POR DINHEIRO E  
PODER, ENTÃO NOSSA  
SOCIEDADE PODERÁ ENFIM  
EVOLUIR A UM NOVO NÍVEL."**

---



DAVID CHRISTIAN

# Origens

*Uma grande história de tudo*

*Tradução*

Pedro Maia Soares



# Sumário

Capa

Folha de rosto

Sumário

*Prefácio*

*Introdução*

*Linha do tempo*

Parte I: Cosmos

1. No princípio: limiar 1
2. Estrelas e galáxias: limiares 2 e 3
3. Moléculas e luas: limiar 4

Parte II: Biosfera

4. Vida: limiar 5
5. A vida pequena e a biosfera
6. A vida grande e a biosfera

Parte III: Nós

7. Seres humanos: limiar 6
8. Agricultura: limiar 7

9. Civilizações agrárias
10. À beira do mundo de hoje
11. O Antropoceno: limiar 8

Parte IV: O futuro

12. Para onde vai tudo isso?

*Agradecimentos*

*Notas*

*Leituras adicionais*

*Apêndice – Estatísticas sobre a história da humanidade*

*Glossário*

*Sobre o autor*

*Créditos*

!

!

## Prefácio

*Contamos histórias para entender as coisas. Está no nosso sangue.*

Lia Hills, *Retorno ao coração*

A ideia de uma história moderna das origens está no ar. Para mim, começou com um curso sobre a história de tudo, que dei pela primeira vez na Universidade Macquarie, em Sydney, em 1989. Eu considerava que esse curso era uma maneira de chegar à história da humanidade. Na época, eu dava aulas e pesquisava a história russa e soviética. Mas temia que lecionar história nacional ou imperial (a Rússia era ambos, nação e império) transmitisse a mensagem subliminar de que os seres humanos estão divididos, no nível mais fundamental, em tribos concorrentes. Era essa uma mensagem útil para transmitir em um mundo com armas nucleares? Nos meus tempos de colégio, durante a Crise dos Mísseis em Cuba, lembro-me vividamente de pensar que estávamos à beira de um apocalipse. Tudo estava prestes a ser destruído. E lembro-me de me perguntar se havia garotos “lá” na União Soviética que estariam igualmente assustados. Afinal, eles também eram seres humanos. Quando criança, eu morei na Nigéria. Isso me deu um forte senso de uma comunidade humana única e extraordinariamente diversificada,

sentimento que foi confirmado quando, na adolescência, fui para o Atlantic College, uma escola internacional no sul do País de Gales.

Várias décadas depois, já historiador profissional, comecei a pensar em como ensinar uma história unificada da humanidade. Poderia dar aulas sobre a herança compartilhada por todos os seres humanos e contar isso com um pouco da grandiosidade e assombro das grandes histórias nacionais? Convenci-me de que precisávamos de uma história na qual nossos ancestrais paleolíticos e agricultores neolíticos pudessem desempenhar um papel tão importante quanto os governantes, conquistadores e imperadores que dominavam como tema de pesquisa e ensino.

Acabei por compreender que não se tratava de uma ideia original. Em 1986, o grande historiador mundial William McNeill afirmou que escrever histórias sobre “os triunfos e tribulações da humanidade como um todo” era “o dever moral da profissão de historiador em nosso tempo”.<sup>1</sup> Bem antes, mas com o mesmo espírito, H. G. Wells escreveu uma história da humanidade em resposta à carnificina da Primeira Guerra Mundial.

Não pode haver paz agora, percebemos, senão uma paz comum em todo o mundo; nenhuma prosperidade, senão uma prosperidade geral. Mas não pode haver paz e prosperidade comuns sem ideias históricas comuns. [...] Com nada além de tradições nacionalistas estreitas, egoístas e conflitantes, as raças e os povos estão fadados a derivar para o conflito e a destruição.<sup>2</sup>

Wells também compreendeu outra coisa: se quisermos ensinar a história da humanidade, é provável que precisemos ensinar a história de tudo. É por isso que seu *Outline of History* [Esboço da história] se transformou numa história do universo. Para entender a história da humanidade, é preciso entender como uma espécie tão estranha evoluiu,

o que significa aprender sobre a evolução da vida no planeta Terra, o que significa aprender sobre a evolução do planeta Terra, o que significa aprender sobre a evolução de estrelas e planetas, o que significa saber sobre a evolução do universo. Hoje, podemos contar essa história com uma precisão e um rigor científico que eram impensáveis quando Wells escreveu seu livro.

Wells procurava um conhecimento unificador — um conhecimento que ligasse tanto disciplinas quanto povos. Todas as histórias das origens unificam o conhecimento, até mesmo aquelas produzidas por historiografias nacionalistas. E a mais ampla delas pode conduzir-nos através de muitas escalas de tempo e através de muitos círculos concêntricos de compreensão e identidade, do eu para a família e o clã, para uma nação, um grupo linguístico ou uma afiliação religiosa, para os enormes círculos da humanidade e da vida e, por fim, à ideia de que fazemos parte de um universo, ou cosmos, inteiro.

Mas, nos últimos séculos, o aumento dos contatos interculturais mostrou o quanto todas as histórias das origens e religiões estão incrustadas nos costumes e ambientes locais. É por isso que a globalização e a disseminação de novas ideias corroeram a fé no conhecimento tradicional. Até os verdadeiros crentes começaram a perceber que havia várias histórias das origens que diziam coisas muito diferentes. Algumas pessoas reagiram com defesas agressivas, até violentas, de suas próprias tradições religiosas, tribais ou nacionais. Mas muitas simplesmente perderam a fé e a convicção e, junto com elas, perderam o rumo, o senso de seu lugar no universo. Essa perda de fé ajuda a explicar a *anomia* generalizada, o sentimento de falta de propósito, de falta de sentido e, às vezes, até de desespero que moldou tanta literatura, arte, filosofia e erudição no século XX. Para muitos, o

nacionalismo oferecia algum sentido de pertencimento, mas no mundo globalmente conectado de hoje está claro que o nacionalismo divide a humanidade, mesmo quando conecta cidadãos dentro de um determinado país.

Escrevi este livro na crença otimista de que nós, modernos, não estamos condenados a um estado crônico de fragmentação e falta de sentido. Dentro do furacão criativo da modernidade, está surgindo uma nova história global das origens que é tão cheia de significado, assombro e mistério quanto qualquer história tradicional das origens, mas que se baseia no conhecimento científico moderno de muitas disciplinas.<sup>3</sup> Essa história está longe de ser completa, e talvez ela precise incorporar os insights de histórias das origens mais antigas sobre como viver bem e como viver de maneira sustentável. Mas vale a pena conhecê-la porque se baseia numa herança global de informações e conhecimentos cuidadosamente testados e é a primeira história das origens a abranger sociedades e culturas humanas de todo o mundo. É um projeto coletivo universal, uma história que deveria funcionar tanto em Buenos Aires quanto em Pequim, em Lagos ou em Londres. Hoje, muitos estudiosos estão engajados na empolgante tarefa de construir e contar essa história moderna das origens, em busca da orientação e da razão de ser compartilhada que ela possa fornecer, como todas as histórias das origens, mas para o mundo globalizado atual.

Minhas tentativas de ensinar história do universo começaram em 1989. Em 1991, como forma de descrever o que eu estava fazendo, comecei a usar a expressão *grande história*.<sup>4</sup> Foi apenas quando a história lentamente entrou em foco que percebi que estava tentando esboçar as principais linhas de uma emergente história global das origens. Hoje, a grande história faz parte do currículo de universidades em diferentes

partes do mundo e, por meio do Projeto Grande História, também está sendo ensinada em milhares de escolas secundárias.

Precisamos dessa nova compreensão do passado para lidarmos com os profundos desafios e oportunidades globais do século XXI. Este livro é minha tentativa de contar uma versão atualizada dessa história enorme, complexa, linda e inspiradora.

## Introdução

*As formas que vêm e vão — e das quais teu corpo é apenas uma — são os lampejos dos meus membros dançantes. Conhece-Me em tudo, e do que terás medo?*

Palavras imaginadas do deus hindu Shiva, por Joseph Campbell, em *O herói de mil faces*

*[...] por impossíveis que sejam todos esses eventos, eles são provavelmente semelhantes aos que ocorrem como a quaisquer outros que nunca afetaram ninguém com a possibilidade.*

James Joyce, *Finnegans Wake*\*

Chegamos a este universo sem que o tenhamos decidido, num tempo e num lugar que não foram de nossa escolha. Por alguns momentos, como vaga-lumes cósmicos, viajaremos com outros seres humanos, com nossos pais, com nossos irmãos e irmãs, com nossos filhos, com amigos e inimigos. Também viajaremos com outras formas de vida, de bactérias a babuínos, com rochas, oceanos e auroras, com luas e meteoros, planetas e estrelas, com quarks e fótons, supernovas e buracos negros, com lesmas e telefones celulares, e com muito, muito espaço vazio. O desfile é copioso, colorido, cacofônico e misterioso, e embora nós, seres humanos, em algum momento devamos deixá-lo, ele seguirá em frente. No futuro remoto, outros viajantes entrarão no desfile e o deixarão. Mas, por fim,

ele se diluirá. Em zilhões de anos, ele desaparecerá como um fantasma ao amanhecer, dissolvendo-se no oceano de energia de onde surgiu.

O que é essa estranha multidão com que viajamos? Qual é o nosso lugar nesse desfile? De onde ele partiu, para onde está indo, e como finalmente desaparecerá?

Hoje, nós humanos podemos contar a história do desfile melhor do que nunca. Podemos determinar com notável precisão o que nos espreita lá fora, a bilhões de anos-luz da Terra, assim como o que aconteceu há bilhões de anos. Podemos fazer isso porque temos muito mais peças do quebra-cabeça do conhecimento, o que torna mais fácil imaginar o quadro inteiro. Trata-se de uma conquista espantosa e muito recente. Muitas das peças da história de nossa origem se encaixaram durante o período de minha existência.

Podemos construir esses vastos mapas do universo e seu passado, em parte porque temos cérebro grande e, como todos os organismos inteligentes, o usamos para criar mapas internos do mundo. Esses mapas fornecem uma espécie de realidade virtual que nos ajuda a encontrar o caminho. Nunca podemos ver o mundo diretamente em todos os seus detalhes; isso exigiria um cérebro tão grande quanto o universo. Mas podemos criar mapas simples de uma realidade fantasticamente complicada e sabemos que esses mapas correspondem a aspectos importantes do mundo real. O diagrama convencional do metrô de Londres ignora a maioria das curvas e viradas, mas mesmo assim ajuda milhões de viajantes a percorrer a cidade. Este livro oferece uma espécie de mapa do metrô de Londres do universo.

O que torna os humanos diferentes de todas as outras espécies inteligentes é a linguagem, uma ferramenta de comunicação extraordinariamente poderosa porque nos permite compartilhar nossos

mapas do mundo individuais e, ao fazê-lo, formar mapas muito maiores e mais detalhados do que aqueles criados por um único cérebro. O compartilhamento também nos permite testar os detalhes de nossos mapas contra milhões de outros mapas. Desse modo, cada grupo de seres humanos constrói uma compreensão do mundo que combina as percepções, as ideias e os pensamentos de muitas pessoas ao longo de milhares de anos e de muitas gerações. Pixel por pixel, através desse processo de aprendizagem coletiva, os seres humanos construíram mapas cada vez mais ricos do universo durante os 200 mil anos de nossa existência como espécie. O que isso significa é que uma pequena parte do universo está começando a olhar para si mesma. É como se o universo estivesse lentamente abrindo um olho depois de um longo sono. Hoje, esse olho está vendo cada vez mais, com a ajuda de intercâmbios globais de ideias e informações; da precisão e do rigor da ciência moderna; de novos instrumentos de pesquisa, desde colisores de partículas atômicas até telescópios espaciais; e de redes de computadores com poderes colossais de processamento de números.

A história que esses mapas nos contam é a maior história que se pode imaginar.

Quando criança, eu não conseguia entender nada a não ser que pudesse colocá-lo em algum tipo de mapa. Como muitas pessoas, lutei para interligar os campos isolados que estudava. A literatura não tinha nada a ver com a física; eu não conseguia ver nenhuma conexão entre filosofia e biologia, ou religião e matemática, ou economia e ética. Continuei procurando uma estrutura, uma espécie de mapa mundial dos diferentes continentes e ilhas do conhecimento humano; eu queria ser capaz de ver como eles se encaixavam. Histórias religiosas tradicionais

nunca funcionaram muito bem para mim porque, tendo vivido na Nigéria quando criança, aprendi muito cedo que diferentes religiões oferecem abordagens diferentes e muitas vezes contraditórias para entender como o mundo veio a ser como é.

Hoje, uma nova abordagem para o entendimento está surgindo em nosso mundo globalizado. Está sendo construída, desenvolvida e propagada coletivamente por milhares de pessoas de vários campos acadêmicos e em numerosos países. Fazer conexões entre essas percepções pode nos ajudar a ver coisas que não conseguimos ver dentro dos limites de uma determinada disciplina; permite-nos ver o mundo do topo de uma montanha, e não do chão. Podemos enxergar os elos que ligam as várias paisagens acadêmicas, de modo que podemos pensar com mais profundidade sobre temas amplos, como a natureza da complexidade, a natureza da vida e até mesmo a natureza de nossa própria espécie! Afinal de contas, estudamos atualmente os seres humanos através de muitas lentes disciplinares diferentes (antropologia, biologia, fisiologia, primatologia, psicologia, linguística, história, sociologia), mas a especialização torna difícil para qualquer indivíduo se afastar o suficiente para ver a humanidade como um todo.

A busca por histórias das origens que possam ligar diferentes tipos de conhecimento é tão antiga quanto a humanidade. Eu gosto de imaginar um grupo de pessoas sentadas ao redor de uma fogueira ao pôr do sol há 40 mil anos. Eu as imagino na margem sul do lago Mungo, na região dos lagos de Willandra, em Nova Gales do Sul, onde foram encontrados os mais antigos restos humanos da Austrália. Hoje, é o lar dos povos paakantji, ngyiampaa e mutthi mutthi, mas sabemos que seus ancestrais viveram nessa região há pelo menos 45 mil anos.

Em 1992, os restos de um ancestral (conhecido como Mungo 1) descobertos por arqueólogos em 1968 foram finalmente devolvidos à comunidade aborígene local. Essa pessoa era uma jovem que havia sido parcialmente cremada.<sup>1</sup> A meio quilômetro de distância, foram encontrados restos de outra pessoa (Mungo 3), provavelmente um homem, que morreu com cerca de cinquenta anos. Ele sofria de artrite e erosão dentária severa, provavelmente causada pelo estiramento de fibras com os dentes para fazer redes ou cordões. Seu corpo fora enterrado com cuidado e reverência e borrifado com ocre vermelho em pó trazido de uma distância de duzentos quilômetros. O Homem Mungo foi devolvido ao lago Mungo em novembro de 2017.

As duas pessoas morreram há cerca de 40 mil anos, quando os lagos de Willandra, agora secos, estavam cheios de água, peixes e mariscos e atraíam multidões de pássaros e animais que podiam ser caçados ou capturados.<sup>2</sup> A vida era bem boa perto do lago Mungo quando eles estavam vivos.

Em minhas imaginadas conversas crepusculares ao redor da fogueira, há meninas e meninos, homens e mulheres mais velhos, pais e avós, alguns envoltos em peles de animais, e bebês de colo. As crianças correm atrás umas das outras na beira do lago, enquanto os adultos estão terminando uma refeição de mexilhões, peixe fresco e caranguejos-do-rio, e bifes de wallaby, um pequeno canguru. Lentamente, a conversa se torna séria e é assumida por uma das pessoas mais velhas. Como em muitos dias longos de verão e noites frias de inverno, os mais velhos estão recontando o que aprenderam com seus ancestrais e mestres. Eles estão fazendo os tipos de pergunta que sempre me fascinaram: como a paisagem, com suas colinas e lagos, seus vales e desfiladeiros, tomou forma? De onde vêm as estrelas? Quando os primeiros humanos

surgiram e de onde eles vieram? Ou sempre estivemos aqui? Somos parentes de lagartos, cangurus e casuares? (A resposta tanto do povo do lago Mungo como da ciência moderna para essa última questão é um “sim!” enfático.) Os contadores de histórias estão ensinando história. Eles estão contando histórias sobre como nosso mundo foi criado por forças e seres poderosos no passado distante.

Contados ao longo de muitas noites e dias, esses relatos descrevem as grandes ideias paradigmáticas do povo do lago Mungo. São as ideias com pernas longas, ideias que podem sustentar a caminhada. Eles se encaixam para formar um vasto mosaico de informações sobre o mundo. Algumas crianças podem achar partes das histórias demasiado complexas e sutis para serem compreendidas na primeira audição. Mas elas as ouvem muitas vezes em diferentes narrativas, e se acostumam a elas e às ideias profundas que carregam. Conforme crescem, as crianças incorporam as histórias. Elas as conhecem intimamente e apreciam melhor sua beleza e seus detalhes e significados mais sutis.

Ao falar sobre as estrelas, a paisagem, os vombates e os wallabies, e o mundo de seus ancestrais, os mestres constroem um mapa compartilhado de compreensão que mostra aos membros da comunidade seu lugar em um universo rico, belo e às vezes aterrorizante: *isso é o que você é; isso é de onde você veio; isso é quem existiu antes de você nascer; isso é a coisa toda da qual você é uma pequena parte; essas são as responsabilidades e os desafios de viver numa comunidade de outros como você.* As histórias têm grande poder porque são confiáveis. Elas *parecem* verdadeiras porque se baseiam no melhor conhecimento transmitido pelos ancestrais ao longo de muitas gerações. Elas foram verificadas quanto a precisão, plausibilidade e coerência, usando-se o rico conhecimento de pessoas, de estrelas, de paisagens, de plantas e

animais disponíveis para a comunidade mungo e seus antepassados e vizinhos.

Todos podemos nos beneficiar dos mapas que nossos ancestrais criaram. O grande sociólogo francês Émile Durkheim enfatizava que os mapas que se escondiam nas histórias das origens e religiões eram fundamentais para nosso senso de identidade. Sem eles, argumentava, as pessoas poderiam cair num sentimento de desespero e de falta de sentido tão profundo que poderia levá-las ao suicídio. Não admira que quase todas as sociedades que conhecemos tenham colocado as histórias das origens no centro da educação. Nas sociedades paleolíticas, os estudantes aprendiam essas histórias com os mais velhos, assim como os estudiosos posteriores aprenderam as principais narrativas do cristianismo, do islamismo e do budismo nas universidades de Paris, Oxford, Bagdá e Nalanda.

No entanto, curiosamente, a educação secular moderna carece de uma história das origens segura que conecte todos os domínios da compreensão. E isso pode ajudar a explicar por que a sensação de desorientação, divisão e ausência de direção que Durkheim descreveu é palpável em todo o mundo atual, em Délhi ou em Lima, tanto quanto em Lagos ou em Londres. O problema é que, num mundo conectado globalmente, há tantas histórias locais das origens que competem pela confiança e atenção das pessoas que elas se atravessam no caminho umas das outras. Assim, a maioria dos educadores modernos se concentra em partes da história, e os estudantes aprendem sobre seu mundo disciplina por disciplina. Hoje, as pessoas aprendem sobre coisas de que nossos ancestrais do lago Mungo nunca tinham ouvido falar, desde cálculo até história moderna e como escrever códigos de computador. Mas, ao contrário do povo do lago Mungo, raramente somos estimulados a

reunir esse conhecimento numa narrativa única e coerente, da mesma forma que globos em salas de aula antiquadas ligavam milhares de mapas locais em um mapa-múndi. E isso nos deixa com uma compreensão fragmentada tanto da realidade quanto da comunidade humana à qual todos nós pertencemos.

## UMA HISTÓRIA MODERNA DAS ORIGENS

E, contudo... em pedaços e fragmentos, está surgindo uma história moderna das origens. Como as histórias contadas no lago Mungo, essa narrativa foi montada por ancestrais e testada e verificada ao longo de muitas gerações e milênios.

É diferente, é claro, das histórias das origens mais tradicionais. Isso ocorre em parte porque não foi construída por uma determinada região ou cultura, mas por uma comunidade global de mais de 7 bilhões de pessoas, de modo que agrega conhecimentos de todas as partes do mundo. Trata-se de uma história das origens para todos os humanos modernos, e se baseia nas tradições globais da ciência moderna.

Ao contrário de muitas histórias das origens tradicionais, a moderna carece de um deus criador, embora tenha energias e partículas tão exóticas quanto os panteões de muitas histórias tradicionais das origens. Como as narrativas do confucionismo ou do budismo antigo, a história moderna diz respeito a um universo que apenas é. Qualquer senso de significado não vem do universo, mas dos seres humanos. “Qual é o sentido do universo?”, perguntou Joseph Campbell, um estudioso de mitos e religiões. “Qual é o sentido de uma pulga? Ela está simplesmente aí, apenas isso, e o seu próprio significado é que você está aí.”<sup>3</sup>

O mundo da história moderna das origens é menos estável, mais turbulento e muito maior do que os mundos de muitas histórias tradicionais das origens. E essas qualidades apontam para as limitações da história moderna das origens. Embora global em seu alcance, é muito recente e tem a crueza e alguns dos pontos cegos da juventude. Ela surgiu num momento muito específico da história humana e é moldada pelas

tradições dinâmicas e potencialmente desestabilizadoras do capitalismo moderno. Isso explica por que, de muitas maneiras, ela carece da sensibilidade profunda à biosfera que está presente nas narrativas das origens dos povos indígenas de todo o mundo.

O universo da história moderna das origens é inquieto, dinâmico, imenso e está em evolução. O geólogo Walter Alvarez lembra-nos como ele é grande ao perguntar quantas estrelas ele contém. A maioria das galáxias tem algo como 100 bilhões de estrelas, e há pelo menos esse tanto de galáxias no universo. Isso significa que existem 100000000000000000000000 (10<sup>22</sup>) estrelas no universo.<sup>4</sup> Novas observações feitas no final de 2016 sugeriram que pode haver muito mais galáxias no universo, então sintá-se à vontade para acrescentar mais alguns zeros a esse número. Nosso Sol é um membro bastante comum dessa enorme gangue.

A história moderna das origens ainda está em construção. Novas seções estão sendo acrescentadas, as peças existentes ainda precisam ser testadas ou arrumadas, e os andaimes e a desordem precisam ser removidos. E ainda há buracos na história, de modo que, como todas as histórias das origens, ela nunca perderá a sensação de mistério e admiração. Mas, nas últimas décadas, nossa compreensão do universo em que vivemos se tornou muito mais rica, e isso pode até aumentar nosso senso de mistério, porque, como escreveu o filósofo francês Blaise Pascal, “o conhecimento é como uma esfera; quanto maior o volume, maior o contato com o desconhecido”.<sup>5</sup> Com todas as suas imperfeições e incertezas, trata-se de uma história que precisamos conhecer, assim como o povo do lago Mungo precisava conhecer suas histórias das origens. A história moderna das origens fala da herança que todos os seres humanos compartilham e, portanto, pode nos preparar para os

enormes desafios e oportunidades que enfrentamos neste momento crucial da história do planeta Terra.

No cerne da história moderna das origens está a ideia da complexidade crescente. Como nosso universo apareceu e como gerou o rico desfile de coisas, forças e seres dos quais fazemos parte? Nós realmente não sabemos do que ele saiu ou se existia alguma coisa antes dele. Mas sabemos que, quando emergiu de uma vasta espuma de energia, nosso universo era extremamente simples. E a simplicidade ainda é sua condição-padrão. Afinal, a maior parte do nosso universo é um espaço frio, escuro e vazio. Não obstante, em ambientes especiais e incomuns, como em nosso planeta, existiam condições e ambientes perfeitos, como o mingau do ursinho na história de Cachinhos Dourados, que não era nem muito quente nem muito frio, nem muito grosso nem muito ralo, mas no ponto ideal para a evolução da complexidade.<sup>6</sup> Nessas condições “Cachinhos Dourados”,<sup>\*\*</sup> coisas cada vez mais complexas surgiram ao longo de muitos bilhões de anos, coisas com mais partes móveis e relações internas mais intrincadas. Não devemos cometer o erro de supor que coisas complicadas são necessariamente melhores que as simples. Mas a complexidade importa para nós, seres humanos, porque somos muito complexos e a sociedade global dinâmica em que vivemos hoje é uma das coisas mais extraordinariamente complexas que conhecemos. Então, entender como as coisas complexas surgiram e quais condições “Cachinhos Dourados” possibilitaram que elas surgissem é uma ótima maneira de entender a nós mesmos e o mundo em que vivemos hoje.

Coisas mais complexas apareceram em pontos de transição fundamentais, e chamarei os mais importantes deles de *limiares*. Os limiares dão forma à narrativa complicada da história moderna das

origens. Eles enfatizam importantes pontos de virada, quando as coisas já existentes foram rearranjadas ou alteradas para criar algo com novas propriedades “emergentes”, atributos que nunca existiram antes. O universo primitivo não tinha estrelas, nem planetas, tampouco organismos vivos. Então, passo a passo, coisas inteiramente novas começaram a aparecer. Estrelas forjaram-se a partir de átomos de hidrogênio e hélio, criaram-se novos elementos químicos dentro de estrelas moribundas, planetas e luas formaram-se a partir de bolhas de gelo e poeira usando esses novos elementos químicos, e as primeiras células vivas desenvolveram-se nos ricos ambientes químicos de planetas rochosos. Nós, seres humanos, somos parte dessa história, porque somos produtos da evolução e diversificação da vida no planeta Terra, porém, no decorrer de nossa breve mas notável história, criamos tantas formas inteiramente novas de complexidade que, hoje, parece que dominamos a mudança em nosso mundo. O aparecimento de algo novo e mais intrincado do que o que o precedeu, algo com novas propriedades emergentes, parece sempre tão miraculoso quanto o nascimento de um bebê, porque a tendência geral do universo é se tornar menos complicado e mais desordenado. No futuro, essa tendência para o aumento da desordem (o que os cientistas chamam de *entropia*) vencerá e o universo se transformará numa espécie de confusão aleatória sem padrão ou estrutura. Mas isso está muito, muito longe no futuro.

Entrementes, parece que vivemos em um universo jovem e vigoroso, cheio de criatividade. O nascimento do universo — nosso primeiro limiar — é tão miraculoso quanto qualquer um dos outros limiares em nossa história moderna das origens.

---

\* Tradução de Donaldo Schüler (Cotia: Ateliê Editorial, 2001).

\*\* Sobre essa expressão e outros termos usados neste livro, ver o Glossário ao final do volume. (N. T.)

## Linha do tempo

Esta linha do tempo fornece algumas datas fundamentais para a história moderna das origens usando tanto datas absolutas aproximadas quanto datas recalculadas, como se o universo tivesse sido criado há 13,8 anos em vez de 13,8 bilhões de anos. Essa segunda abordagem facilita a compreensão da forma cronológica da história. Afinal, a seleção natural não projetou nossas mentes para lidar com milhões ou bilhões de anos, então essa cronologia mais curta deve ser mais fácil de entender.

A maioria das datas dadas para eventos que ocorreram há mais de alguns milhares de anos foram estabelecidas somente nos últimos cinquenta anos, utilizando-se modernas tecnologias cronométricas, das quais a mais importante é a datação radiométrica.

EVENTO	DATA ABSOLUTA APROXIMADA	DATA DIVIDIDA POR 1 BILHÃO
LIMIAR 1: Big bang, origem do nosso universo	Há 13,8 bilhões de anos	Há 13 anos e 8 meses
LIMIAR 2: As primeiras estrelas começam a brilhar	Há 13,2 (?) bilhões de anos	Há 13 anos e 2 meses
LIMIAR 3: Novos elementos forjados em grandes estrelas moribundas	Continuamente do limiar 2 aos dias atuais	Continuamente do limiar 2 aos dias atuais
LIMIAR 4: Formam-se nosso Sol e o sistema solar	Há 4,5 bilhões de anos	Há 4 anos e 6 meses

LIMIAR 5: A mais antiga vida na Terra	Há 3,8 bilhões de anos	Há 3 anos e 9 meses
Os primeiros grandes organismos na Terra	Há 600 milhões de anos	Há 7 meses
Um asteroide acaba com os dinossauros	Há 65 milhões de anos	Há 24 dias
A linhagem dos hominínios se separa da linhagem dos chimpanzés	Há 7 milhões de anos	Há 2,5 dias
<i>Homo erectus</i>	Há 2 milhões de anos	Há 17 horas
LIMIAR 6: Primeira evidência de nossa espécie, <i>Homo sapiens</i>	Há 200 mil anos	Há 100 minutos
LIMIAR 7: Fim da última era do gelo, início do Holoceno, primeiros sinais de agricultura	Há 10 mil anos	Há 5 minutos
Primeiros sinais de cidades, Estados, civilizações agrárias	Há 5 mil anos	Há 2,5 minutos
Florescimento dos impérios Romano e Han	Há 2 mil anos	Há 1 minuto
Zonas do mundo começam a se conectar	Há 500 anos	Há 15 segundos
LIMIAR 8: Início da revolução dos combustíveis fósseis	Há 200 anos	Há 6 segundos
A Grande Aceleração; o homem vai à Lua	Há 50 anos	Há 1,5 segundo
LIMIAR 9 (?): Uma ordem mundial sustentável?	100 anos no futuro?	Dentro de 3 segundos
O Sol morre	4,5 bilhões de anos no futuro	Dentro de 4 anos e seis meses
O universo desaparece na escuridão; a entropia vence	Zilhões e zilhões de anos no futuro	Dentro de bilhões e bilhões de anos

PARTE I  
COSMOS

# 1. No princípio: limiar 1

*Se quiser fazer uma torta de maçã a partir do zero, você primeiro terá de inventar o universo.*

Carl Sagan, *Cosmos*\*

*Assim deve ter sido após o nascimento da luz elementar  
No primitivo espaço giratório, e os ardentes cavalos encantados  
Saíam relinchando da verde estrebaria  
Rumo aos campos da celebração.*

Dylan Thomas, *Colina de samambaias*\*\*

## PEGANDO NO TRANCO UMA HISTÓRIA DAS ORIGENS

*Bootstrapping* é a tarefa impossível de se erguer no ar, puxando com *muita, muita* força os cadarços de seu calçado. A ideia entrou no jargão do computador (*booting* ou *rebooting* — inicialização ou reinicialização) para descrever como essas máquinas despertam dos mortos e, em seguida, carregam as instruções que lhes dizem o que fazer a seguir. Literalmente, é óbvio que o *bootstrapping* é impossível, porque, para levantar alguma coisa, precisa-se de algo para fornecer alavancagem. “Deem-me uma alavanca e um ponto de apoio e moverei a Terra”, disse o filósofo grego Arquimedes. Mas o que poderia alavancar a criação de um novo universo? Como se inicializa um universo? Ou, por falar nisso, como se inicializa a história das origens que descreve como um novo universo apareceu?

Inicializar histórias das origens é quase tão difícil quanto inicializar universos. Uma abordagem possível é sumir com o problema do início, supondo que o universo sempre esteve presente. Nenhuma inicialização necessária. Muitas histórias das origens fizeram isso. Bem como muitos astrônomos modernos, inclusive aqueles que apoiaram a teoria do estado estacionário, em meados do século XX. Trata-se da ideia de que, em grandes escalas, o universo sempre foi mais ou menos como é hoje. Semelhante, mas sutilmente diferente, é a ideia de que, de fato, houve um momento de criação quando grandes forças ou seres percorreram o universo fazendo coisas, mas desde então nada mudou muito. Os anciões do lago Mungo podem ter concebido o universo desse modo, descrevendo um mundo trazido à vida por seus ancestrais mais ou menos em sua forma atual. Isaac Newton considerava Deus a “primeira

causa” de tudo e argumentou que Ele estava presente em todo o espaço. É por isso que Newton pensava que o universo como um todo não mudou muito. O universo, escreveu ele certa vez, era “o Sensorium de um Ser incorpóreo, vivo e inteligente”.<sup>1</sup> No início do século XX, Einstein tinha tanta certeza de que o universo era imutável (em grandes escalas) que acrescentou uma constante especial à sua teoria da relatividade para fazê-la prever um universo estável.

A ideia de um universo eterno ou imutável é satisfatória? Não mesmo, sobretudo se você precisar contrabandear um criador para iniciar o processo, como em “No princípio não havia nada, então Deus fez...”. A falha lógica é óbvia, embora algumas mentes sofisticadas tenham levado muito tempo para vê-la com clareza. Com a idade de dezoito anos, Bertrand Russell desistiu da ideia de um deus criador depois de ler a seguinte passagem na autobiografia de John Stuart Mill: “Meu pai me ensinou que a pergunta ‘Quem me fez?’ não pode ser respondida, pois sugere imediatamente a pergunta seguinte: ‘Quem fez Deus?’”.<sup>2</sup>

E há outro quebra-cabeça. Se um deus é poderoso o suficiente para criar um universo, esse deus com certeza deve ser mais complexo do que o universo. Supor então um deus criador significa explicar um universo fantasticamente complexo imaginando algo ainda mais complexo que justamente... o criou. Alguns podem pensar que isso é trapacear.

Os antigos hinos indianos conhecidos como os Vedas protegem suas apostas. “Não havia não existência nem existência então; não havia o reino do espaço nem o do céu que está além.”<sup>3</sup> Talvez tudo tenha surgido de uma espécie de tensão primordial entre o ser e o não ser, um reino obscuro que não era bem alguma coisa, mas que poderia *se tornar* alguma coisa. Talvez, como diz um moderno ditado aborígine australiano, nada seja *inteiramente* nada.<sup>4</sup> É uma ideia complicada, e

alguns talvez a descartassem por ser obscura e mística, se ela não tivesse paralelos impressionantes com a ideia moderna, incorporada na física quântica, de que o espaço nunca é *inteiramente* vazio, mas é cheio de possibilidades.

Existe algum tipo de oceano de energia ou potencial de onde formas particulares emergem, como ondas ou tsunâmis? Trata-se de um conceito tão comum que é tentador pensar que nossas ideias sobre a origem última vêm de nossas próprias experiências. Todas as manhãs, cada um de nós experimenta como um mundo consciente, com formas, sensações e estruturas, parece emergir de um mundo inconsciente caótico. Joseph Campbell escreve:

Do mesmo modo que a consciência do indivíduo permanece num mar de escuridão, ao qual desce em sono profundo e do qual desperta misteriosamente, assim também o universo, nas imagens do mito, é precipitado, e permanece numa atemporalidade na qual volta a dissolver-se.<sup>5</sup>

Mas talvez isso seja metafísico demais. A dificuldade talvez seja lógica. Stephen Hawking afirma que a questão das origens é apenas mal colocada. Se a geometria do espaço-tempo é esférica, como a superfície da Terra, mas em mais dimensões, perguntar o que existia antes do universo é como procurar um ponto de partida na superfície de uma bola de tênis. Não é assim que funciona. Não há borda nem começo no tempo, assim como não há borda na superfície da Terra.<sup>6</sup>

Hoje, alguns cosmólogos são atraídos por outro conjunto de conceitos que nos remetem à ideia de um universo sem começo nem fim. Nosso universo talvez faça parte de um multiverso infinito em que novos universos continuem surgindo de big bangs. Isso pode estar certo, mas no momento não temos provas concretas de nada antes de nosso próprio big bang local. É como se a criação do nosso universo tivesse sido tão

violenta que qualquer informação sobre de onde ele saiu foi apagada. Se existem outras aldeias cosmológicas, ainda não podemos vê-las.

Francamente, não temos hoje respostas melhores para o problema da origem última do que as de qualquer sociedade humana anterior. Inicializar um universo ainda parece um paradoxo lógico e metafísico. Não sabemos quais condições Cachinhos Dourados permitiram que um universo surgisse, e ainda não podemos explicá-lo melhor do que o romancista Terry Pratchett quando escreveu: “O estado atual do conhecimento pode ser resumido assim: no começo, não havia nada, que explodiu”.<sup>7</sup>

## LIMIAR 1: A INICIALIZAÇÃO QUÂNTICA DO UNIVERSO

A inicialização para a narrativa mais amplamente aceita das origens últimas é a ideia de um big bang. Trata-se um dos principais paradigmas da ciência moderna, como a seleção natural em biologia ou a tectônica de placas em geologia.<sup>8</sup>

Foi somente no início da década de 1960 que as partes cruciais da história do big bang surgiram. Foi quando os astrônomos detectaram pela primeira vez a radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMBR) — uma energia que sobrou do big bang e está presente em todo o universo atual. Embora os cosmólogos ainda batalhem para entender o momento em que nosso universo apareceu, eles podem contar uma história divertida que começa por volta (respiração profunda, e espero que este seja o número exato) um bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de bilionésimo de um segundo depois que o universo apareceu (cerca de  $10^{-43}$  de segundo após o tempo zero).

A história básica é assim: nosso universo começou como um ponto menor que um átomo. Quão pequeno é isso? As mentes de nossa espécie evoluíram para lidar com as coisas em escalas humanas, então elas lutam com coisas minúsculas como esta, mas pode ajudar saber que se poderia espremer 1 milhão de átomos no ponto no final desta frase.<sup>9</sup> No momento do big bang, todo o universo era menor que um átomo. Empacotadas nisso estavam toda a energia e a matéria presentes no universo de hoje. Toda. É uma ideia assustadora e, a princípio, pode parecer totalmente louca. Mas todas as evidências que temos hoje nos dizem que esse objeto estranho, minúsculo e fantasticamente quente realmente existiu em torno de 13,82 bilhões de anos atrás.

Ainda não entendemos como e por que essa coisa apareceu. Mas a física quântica nos diz, e aceleradores de partículas — que aceleram partículas subatômicas a altas velocidades por meio de campos elétricos ou eletromagnéticos — nos *mostram* que algo realmente pode aparecer do nada num vácuo, embora assimilar o que isso significa requeira uma compreensão sofisticada do *nada*. Na física quântica moderna, é impossível determinar com precisão a posição e o movimento das partículas subatômicas. Isso significa que nunca se pode dizer com certeza que uma determinada região do espaço está vazia, e isso significa que o vazio está tenso com a possibilidade de que algo possa aparecer. Como a “nem não existência nem existência” dos Vedas indianos, essa tensão parece ter inicializado nosso universo.<sup>10</sup>

Hoje, nos referimos ao primeiro momento do universo como o “big bang”, o grande estrondo, como se o universo gritasse ao nascer como um bebê recém-nascido. Esse termo bonitinho foi cunhado em 1949 pelo astrônomo inglês Fred Hoyle, que achava a ideia ridícula. No início da década de 1930, quando o conceito de big bang foi lançado pela primeira vez, o astrônomo belga (e padre católico) Georges Lemaître chamou o universo recém-nascido de “ovo cósmico” ou “átomo primordial”. Estava claro para os poucos cientistas que levaram a sério a ideia que, com tanta energia espremida dentro dele, o átomo primordial tinha de ser inconcebivelmente quente e tinha de se expandir como louco para aliviar a pressão. A expansão continua hoje; é como se uma vasta mola estivesse se desenrolando há mais de 13 bilhões de anos.

Muita coisa aconteceu nos primeiros segundos e minutos depois do big bang. O mais importante é que surgiram as primeiras estruturas e padrões interessantes, as primeiras entidades ou energias que tinham formas e propriedades distintivas *não* aleatórias. O surgimento de algo

com novas características distintivas é sempre mágico. Veremos que isso acontece repetidas vezes na história moderna das origens, embora o que a princípio parece ser mágico possa parecer menos mágico depois que compreendemos que a coisa nova e suas novas qualidades não surgiram de nenhum lugar, tampouco do nada. Novas coisas com novas propriedades emergem de coisas e forças já existentes que são organizadas de novas maneiras. São os novos arranjos que geram as novas propriedades, da mesma forma que organizar as peças de uma maneira diferente pode gerar um novo padrão em um mosaico. Tome-se um exemplo da química. Normalmente pensamos em hidrogênio e oxigênio como gases incolores. Mas juntemos dois átomos de hidrogênio a um único átomo de oxigênio numa determinada configuração, e teremos uma molécula de água. Juntemos muitas dessas moléculas e teremos a qualidade totalmente nova que consideramos “aquosidade”. Quando vemos uma nova forma ou estrutura com novas qualidades, estamos realmente vendo novos arranjos do que já existia. Inovação é surgimento. Se pensarmos no surgimento como um personagem de nossa história, é provável que seja furtivo, misterioso e imprevisível, e que surja inesperadamente da escuridão e leve o enredo em direções novas e surpreendentes.

As primeiras estruturas e padrões do universo surgiram exatamente dessa maneira, à medida que as coisas e as forças que saltavam do big bang se organizavam em novas configurações.

No primeiro momento para o qual temos alguma evidência, uma fração de segundo após o big bang, o universo consistia de energia pura, aleatória, indiferenciada e disforme. Podemos pensar em energia como o *potencial de algo acontecer*, a capacidade de *fazer* coisas ou de *mudar* coisas. As energias dentro do átomo primevo eram espantosas, muitos

trilhões de graus acima do zero absoluto. Houve um breve período de expansão extremamente rápida conhecida como *inflação*. A expansão foi tão rápida que grande parte do universo pode ter sido projetada muito além de qualquer coisa que possamos ver. Isso significa que o que vemos hoje é provavelmente apenas uma parte minúscula de todo o nosso universo.

Uma fração de segundo depois, o ritmo da expansão diminuiu. As energias turbulentas do big bang se estabeleceram e, à medida que o universo se expandia, elas se espalharam e se diluíram. As temperaturas médias caíram e continuaram a cair, de tal modo que, hoje, a maior parte do universo está a apenas 2,76 graus Celsius acima do zero absoluto. (O zero absoluto é a temperatura em que nada nem mesmo se sacode.) Não sentimos o frio, tampouco qualquer outro organismo no planeta Terra, porque somos aquecidos pela fogueira do nosso Sol.

Nas temperaturas extremas do big bang, quase tudo era possível. Mas, quando as temperaturas caíram, as possibilidades se estreitaram. Diferentes entidades começaram a emergir como fantasmas dentro da neblina caótica do universo em resfriamento, entidades que não poderiam existir no violento caldeirão do próprio big bang. Os cientistas chamam essas mudanças de forma e estrutura de *mudanças de fase*. Vemos mudanças de fase em nossa vida diária quando o vapor perde energia e se transforma em água (cujas moléculas se movem muito menos que as moléculas de vapor) e quando a água se transforma em gelo (que tem tão pouca energia que suas moléculas apenas sacolejam). Água e gelo podem existir apenas em uma faixa estreita de temperaturas muito baixas.

Em um bilionésimo de um bilionésimo de um bilionésimo de um bilionésimo de segundo após o big bang, a própria energia sofreu uma

mudança de fase. Ela se dividiu em quatro espécies muito diferentes. Hoje, as conhecemos como gravidade, força eletromagnética e forças nucleares fortes e fracas. Precisamos nos familiarizar com suas diferentes personalidades, porque elas moldaram nosso universo. A gravidade é fraca, mas atinge vastas distâncias e sempre junta as coisas, de modo que seu poder se acumula. Isso tende a tornar o universo mais aglutinado. A energia eletromagnética vem em formas positivas e negativas, por isso muitas vezes se anula. A gravidade, embora fraca, molda o universo em grande escala. Mas o eletromagnetismo domina no nível da química e da biologia, então é o que mantém nossos corpos juntos. A terceira e a quarta forças fundamentais são conhecidas, sem grande entusiasmo, como forças nucleares fortes e fracas. Elas alcançam distâncias minúsculas, então são importantes numa escala subatômica. Nós, humanos, não as experimentamos diretamente, mas elas moldam todos os aspectos do nosso mundo porque determinam o que acontece dentro dos átomos.

Talvez existam outras espécies de energia. Na década de 1990, novas medidas do ritmo de expansão do universo mostraram que o ritmo está aumentando. Tomando emprestada uma ideia inicialmente apresentada por Einstein, muitos físicos e astrônomos afirmam agora que pode haver uma forma de antigravidade presente em todo o espaço, de modo que seu poder aumenta à medida que o universo se expande. Hoje, a massa dessa energia pode representar até 70% da massa total do universo. Mas, mesmo que esteja começando a dominar nosso universo, ainda não entendemos o que é essa energia ou como ela funciona, então os físicos a chamam de *energia escura*. O termo é um guardador de lugar. Observe este espaço, porque entender a energia escura é um dos grandes desafios da ciência contemporânea.

A matéria apareceu no primeiro segundo após o big bang. A matéria é a substância que a energia empurra para lá e para cá. Até pouco mais de um século atrás, cientistas e filósofos supunham que matéria e energia eram distintas. Agora sabemos que a matéria é realmente uma forma altamente comprimida de energia. O jovem Albert Einstein demonstrou isso num famoso artigo de 1905. Aquela fórmula — energia (E) é igual a massa (m) vezes a velocidade da luz (c) ao quadrado, ou  $E = mc^2$  — nos diz quanta energia está comprimida dentro de uma determinada quantidade de matéria. Para descobrir quanta energia está trancada em um pedaço de matéria, multiplica-se a massa da matéria, não pela velocidade da luz (que é mais de 1 bilhão de quilômetros por hora), mas pela velocidade da luz *vezes ela mesma*. Trata-se de um número colossal, então se descomprimos um pouquinho de matéria, teremos uma enorme quantidade de energia. É o que acontece quando uma bomba H explode. No início do universo, o processo oposto ocorreu. Enormes quantidades de energia foram comprimidas em pequenas quantidades de matéria, como partículas de poeira num vasto nevoeiro de energia. O incrível é que nós, seres humanos, conseguimos recriar brevemente tais energias no Grande Colisor de Hádrons, nos arredores de Genebra. E, de fato, as partículas começam a saltar para fora desse oceano de energia fervente.

E ainda estamos no primeiro segundo...

## AS PRIMEIRAS ESTRUTURAS

Dentro da névoa caótica de energia logo após o big bang, formas e estruturas distintas começaram a aparecer. Embora a neblina de energia esteja sempre presente, as estruturas que emergiram dela darão forma e enredo à nossa história das origens. Algumas estruturas ou padrões durarão bilhões de anos, algumas, uma fração de segundo, mas *nenhuma* se conserva. Elas são evanescentes, como ondas na superfície do oceano. A primeira lei da termodinâmica nos diz que o oceano de energia está sempre presente; ele se conserva. A segunda lei da termodinâmica nos diz que todas as formas que emergem acabarão por se dissolver no oceano de energia. As formas, como os movimentos de uma dança, *não* se conservam.

Algumas estruturas e formas distintas surgiram um segundo após o big bang. Por quê? Por que o universo não é apenas um fluxo aleatório de energia? Eis uma questão fundamental.

Se nossa história tivesse um deus criador, seria fácil explicar a estrutura. Poderíamos simplesmente supor (como fazem muitas histórias das origens) que Deus preferiu estruturas ao caos. Mas a maioria das versões da história moderna das origens não aceita mais a ideia de um deus criador, porque a ciência moderna não encontra prova direta de um deus. Muitas pessoas têm *experiências* de deuses, mas essas experiências relatadas são diferentes e contraditórias, e não podem ser reproduzidas. Elas são maleáveis demais, difusas demais e subjetivas demais para fornecer provas científicas objetivas.

Assim, a história moderna das origens precisa encontrar outras formas de explicar o surgimento de estruturas e formas. E isso não é fácil,

porque a segunda lei da termodinâmica nos diz que, mais cedo ou mais tarde, todas as estruturas acabarão por se romper. Como escreveu o físico austríaco Erwin Schrödinger:

Agora reconhecemos que essa lei fundamental da física é apenas a tendência natural das coisas de se aproximarem do estado caótico (a mesma tendência que exibem os livros de uma biblioteca ou as pilhas de papéis e manuscritos sobre uma escrivaninha), a menos que a previnamos.<sup>11</sup>

Se existe um vilão na história moderna das origens, é certamente a entropia, a tendência aparentemente universal das estruturas a se dissolverem na aleatoriedade. A entropia é o servidor fiel da segunda lei da termodinâmica. Então, se pensarmos na entropia como uma personagem de nossa história, devemos imaginá-la como dissoluta, à espreita, indiferente à dor e ao sofrimento dos outros, sem interesse em olhar nos nossos olhos. A entropia também é muito, muito perigosa e, no final, nos apanhará a todos. A entropia está no final de todas as histórias das origens. Ela dissolverá todas as estruturas, todas as formas, todas as estrelas, todas as galáxias e todas as células vivas. Joseph Campbell descreveu poeticamente o papel da entropia em um livro sobre mitologia: “O mundo, tal como o conhecemos [...], produz apenas um final: morte, desintegração, desmembramento e crucificação do nosso coração com a passagem das formas que amamos”.<sup>12</sup>

A ciência moderna explica o papel da entropia na linguagem fria da estatística. De todas as miríades de maneiras como as coisas podem ser organizadas, a esmagadora maioria é desestruturada, aleatória, desordenada. A maioria das mudanças é como pegar um baralho de  $10^{80}$  cartas (ou seja, 10 seguido por 79 zeros, ou aproximadamente o número de átomos no universo) e embaralhá-lo várias vezes na esperança de encontrar todos os ases um ao lado do outro. Trata-se de um padrão

inimaginavelmente raro, tão raro que é improvável que você o veja, mesmo que continue a embaralhar tantas vezes quanto a idade do universo. Na maioria das vezes você vai encontrar pouca ou nenhuma estrutura. Se você jogar uma bomba em um canteiro de obras cheio de tijolos, argamassa, fios e tinta, quais são as chances de que, quando a poeira baixar, você encontre um prédio de apartamentos todo equipado, decorado e pronto para os compradores? O mundo da magia pode ignorar a entropia, mas o nosso mundo não pode. É por isso que a maior parte do universo, em particular os vastos espaços vazios entre as galáxias, não tem forma nem estrutura.

A entropia é tão poderosa que não é fácil entender como as estruturas, para começo de conversa, apareceram. Mas sabemos que apareceram. E parece que foi com permissão da entropia. É como se, em troca de deixar as coisas se unirem para formar estruturas mais complexas, a entropia exigisse um imposto de complexidade, a ser pago em energia. Com efeito, veremos que a entropia exigiu muitos tipos diferentes de impostos sobre a complexidade, um pouco como o imperador russo Pedro, o Grande, que criou uma agência especial do governo para imaginar novos impostos. A entropia gosta desse acordo porque os impostos pagos por todas as entidades complexas a ajudarão na lúgubre tarefa de transformar todo o universo em mingau. O próprio ato de pagar os impostos da entropia cria mais caos e mais desperdício, assim como administrar uma cidade moderna gera enormes quantidades de lixo e calor. Todos nós pagamos os impostos da entropia a cada segundo de nossa vida. Deixaremos de pagar no dia em que morrermos.

Então, como surgiram as primeiras estruturas? Eis um problema para o qual a ciência ainda não tem respostas completas, embora existam muitas ideias promissoras.

Além da energia e da matéria, surgiram do big bang algumas regras operacionais básicas. Os cientistas só começaram a entender como essas regras eram fundamentais durante a Revolução Científica do século XVII. Hoje, descrevemos essas regras como sendo as leis fundamentais da física. Elas explicam por que as energias frenéticas e caóticas do átomo primevo não eram completamente desorientadas: as leis da física direcionavam a mudança para determinados caminhos e bloqueavam uma gama quase infinita de outras possibilidades. As leis da física deixavam de fora os estados do universo que não eram compatíveis com elas, de modo que, em qualquer momento dado, o universo existia em apenas um dos muitos estados que *eram compatíveis* com as regras operacionais do universo. Esses novos estados, por sua vez, geravam mais regras que direcionavam a mudança para novos caminhos.

Essa filtragem constante de estados impossíveis garantiu um mínimo de estrutura. Não sabemos por que essas regras surgiram ou por que elas assumiram suas formas presentes. Nem mesmo sabemos se eram inevitáveis. Talvez existam outros universos com regras ligeiramente diferentes. Em alguns universos a gravidade talvez seja mais forte ou o eletromagnetismo seja mais fraco. Se assim for, os habitantes desses universos (se houver algum) contarão histórias diferentes das origens. Talvez alguns universos tenham durado um milionésimo de segundo, enquanto outros existirão por muito mais tempo que o nosso. Talvez alguns universos gerem muitas formas de vida exóticas, enquanto outros sejam cemitérios biológicos. Se nosso universo existe de fato em um multiverso, então podemos imaginar um grande lançamento de dados quando nosso universo foi criado, seguido por um anúncio: “O.k., haverá gravidade neste universo, e também eletromagnetismo, que vai ser  $10^{36}$  vezes mais forte que a gravidade”. (Essa é realmente a razão entre

a força da gravidade e o eletromagnetismo, pelo menos em nosso universo.) A existência dessas regras assegurou que nosso universo nunca viesse a ser totalmente caótico. Estava garantido que alguma coisa interessante surgiria em algum lugar.

Houve estruturas e padrões assim que a energia emergiu em formas distintas. Quando a energia congelou nas primeiras partículas de matéria, estas também tiveram regras. Nêutrons, prótons e elétrons, os constituintes básicos dos átomos, surgiram segundos após o big bang, assim como as antipartículas de prótons e elétrons (isto é, prótons carregados negativamente e elétrons carregados positivamente), formando o que os físicos chamam de *matéria* e *antimatéria*. Quando o universo mergulhou abaixo das temperaturas nas quais a matéria e a antimatéria poderiam ser facilmente criadas, ocorreu uma violenta competição de demolição em todo o universo na qual matéria e antimatéria se aniquilaram mutuamente, liberando enormes quantidades de energia. Felizmente para nós, um minúsculo excedente de matéria (talvez uma partícula em 1 bilhão) sobreviveu à carnificina. As partículas restantes de matéria ficaram presas no lugar porque as temperaturas logo ficaram baixas demais para transformá-las em energia pura. E é desse resto de substância que nosso universo é feito.

À medida que as temperaturas caíram, a matéria se diversificou. Elétrons e neutrinos eram regidos pelo eletromagnetismo e pela força nuclear fraca. Os prótons e nêutrons que formam os núcleos atômicos eram feitos de trigêmeos de estranhas partículas conhecidas como quarks, unidas pela força nuclear forte. Elétrons, nêutrons, quarks, prótons, neutrinos... Apenas alguns segundos após o big bang, nosso universo em resfriamento rápido se fechou em algumas estruturas distintas, cada uma com suas propriedades emergentes próprias. Mas,

quando o furacão do big bang acalmou, as energias extremas necessárias para liberar essas estruturas primordiais desapareceram, e é por isso que, para nós, as diferentes formas de energia e partículas, como prótons e elétrons, parecem mais ou menos imortais.

É assim que acaso e necessidade se combinaram para produzir as primeiras estruturas simples. As leis da física eliminaram muitas possibilidades — essa foi a parte da necessidade. O acaso reorganizou as coisas aleatoriamente a partir das possibilidades que restaram. É assim que tudo funciona. Como o nanofísico Peter Hoffmann diz:

Temperado pela lei física, que acrescenta uma pitada de necessidade, o acaso torna-se a força criativa, o motor e o agitador de nosso universo. Toda a beleza que vemos ao nosso redor, das galáxias aos girassóis, é resultado dessa colaboração criativa entre o caos e a necessidade.<sup>13</sup>

## OS PRIMEIROS ÁTOMOS

Alguns minutos depois do big bang, quando prótons e nêutrons se uniram, mais estruturas apareceram. Um único próton é o núcleo de um átomo de hidrogênio; um par de prótons (com dois nêutrons) forma o núcleo de um átomo de hélio, então o universo estava começando a construir os primeiros átomos. Mas é preciso muita energia para fundir os prótons porque suas cargas positivas se repelem mutuamente e as temperaturas estavam caindo rapidamente logo após o big bang, de tal modo que era impossível fundir mais prótons para formar os núcleos de átomos maiores. Isso explica um aspecto fundamental do nosso universo: quase três quartos de todos os seus átomos são hidrogênio, e a maioria do restante é hélio.

Uma quantidade muito maior de matéria consiste em *matéria escura*, coisa que ainda não entendemos, embora saibamos que ela existe porque sua atração gravitacional determina a estrutura e a distribuição das galáxias. Então, poucos minutos depois do big bang, nosso universo consistia em vastas nuvens de matéria escura nas quais estavam embutidos crepitantes plasmas de prótons e elétrons com fótons de luz fluindo através deles. Hoje, encontramos plasmas apenas no centro das estrelas.

Agora devemos fazer uma pausa e esperar cerca de 380 mil anos (quase o dobro do tempo em que nossa espécie existe na Terra). Durante esse período, o universo continuou esfriando. Quando as temperaturas caíram abaixo de 10 mil graus Celsius, houve mais uma mudança de fase, como vapor se transformando em água. Para explicar essa mudança de fase, precisamos entender que o calor é realmente uma medida do

movimento dos átomos. Todas as partículas de matéria se sacodem constantemente com energia, como crianças nervosas, e a temperatura é uma medida do grau médio de agitação. O vaivém é real. Em um famoso artigo publicado em 1905, Einstein mostrou que o vaivém dos átomos causa a rotação aleatória de partículas de poeira no ar. À medida que as temperaturas caem, as partículas se agitam menos, até que por fim podem se ligar. Enquanto o universo esfriava, a força eletromagnética puxou elétrons carregados negativamente na direção de prótons positivamente carregados até que os elétrons se acalmassem o suficiente para cair em órbitas ao redor de prótons. E *voilà!* Ali estavam os primeiros átomos, os constituintes básicos de toda a matéria ao nosso redor.

Os átomos isolados costumam ser eletricamente neutros, porque as cargas positivas e negativas de seus prótons e elétrons se anulam mutuamente. Desse modo, quando os primeiros átomos de hidrogênio e hélio se formaram, a maior parte da matéria no universo ficou repentinamente neutra e o plasma formigante evaporou. Os fótons, portadores da força eletromagnética, podiam agora fluir com liberdade através de uma névoa eletricamente neutra de átomos e matéria escura. Hoje, os astrônomos podem detectar os resultados dessa mudança de fase, porque os fótons que escaparam do plasma geraram um fino fundo de energia (a radiação cósmica de fundo em micro-ondas) que ainda permeia todo o universo.

Nossa história das origens cruzou seu primeiro limiar. Temos um universo. Ele já possui algumas estruturas com propriedades emergentes distintas. Tem formas distintas de energia e matéria, cada uma com sua própria personalidade. Tem átomos. E tem suas próprias regras de funcionamento.

## QUAIS SÃO AS EVIDÊNCIAS?

Por mais bizarra que essa história possa parecer quando a escutamos pela primeira vez, temos de levá-la a sério, porque está apoiada numa grande quantidade de evidências.

O primeiro sinal de que o big bang realmente aconteceu foi a descoberta de que o universo está em expansão. Se está se expandindo agora, a lógica nos diz que, em algum momento no passado remoto, ele deve ter sido infinitesimalmente pequeno. Sabemos que o universo está se expandindo porque temos instrumentos e técnicas de observação que não estavam à disposição do povo do lago Mungo, embora possamos ter certeza de que eles eram excelentes astrônomos a olho nu.

A maioria dos astrônomos, desde a época de Newton, presumiu que o universo devia ser infinito, porque, se não fosse, as leis da gravidade deveriam ter reunido seu conteúdo em uma única massa espessa, como óleo no cárter. No século XIX, os astrônomos já contavam com instrumentos precisos o suficiente para começar a mapear a distribuição de estrelas e galáxias, e os mapas astronômicos que criaram começaram a sugerir uma imagem muito diferente do universo.

O mapeamento começou com nebulosas, borrões difusos que apareciam em todos os mapas estelares. (Sabemos hoje que a maioria das nebulosas são galáxias inteiras, cada uma com bilhões de estrelas.) A que distância estavam as nebulosas? O que eram exatamente? Estavam em movimento? Com o tempo, os astrônomos aprenderam a extrair cada vez mais informações a respeito das estrelas a partir da luz que emitem. Entre essas informações está a distância a que estão de nós e se estão se aproximando ou se afastando.

Um dos métodos mais engenhosos para estudar o movimento das estrelas e nebulosas usa o efeito Doppler (nome que homenageia o matemático austríaco do século XIX Christian Andreas Doppler) para medir a velocidade com que as estrelas ou nebulosas estão se aproximando ou se afastando de nós. A energia viaja em ondas e as ondas, como as da praia, têm uma frequência. Elas alcançam picos em um ritmo regular que podemos medir. Mas a frequência muda se nos mexermos. Se entrarmos no oceano e nadarmos, a frequência com que encontramos as ondas parece aumentar. A mesma coisa acontece com as ondas sonoras. Se um objeto, como uma motocicleta, estiver fazendo barulho e se movendo em nossa direção, a frequência das ondas sonoras parecerá aumentar, e nossos ouvidos interpretarão a frequência mais alta como um tom mais alto. Depois que ela passa, o tom parece cair, porque agora as ondas estão sendo esticadas. O piloto, é claro, não está se movendo em relação à moto e continua ouvindo o mesmo tom. O efeito Doppler é a aparente mudança na frequência das emissões eletromagnéticas à medida que os objetos se aproximam ou se afastam um do outro.

O mesmo princípio funciona para a luz das estrelas. Se uma estrela ou galáxia estiver se aproximando da Terra, a frequência de suas ondas de luz parecerá aumentar. Nossos olhos interpretam a luz visível de alta frequência como luz azul, por isso dizemos que ela se aproximou da extremidade azul do espectro eletromagnético. Mas se estiver se afastando da Terra, a frequência de sua luz parecerá mudar para a extremidade vermelha do espectro; os astrônomos dizem que ela se desvia para o vermelho. E podemos calcular a velocidade do movimento de uma estrela ou galáxia medindo o quanto essa frequência mudou.

Em 1814, o jovem cientista alemão Joseph von Fraunhofer criou o primeiro espectroscópio científico, um prisma especializado que divide as frequências da luz estelar exatamente como um prisma de vidro divide a luz nas cores do arco-íris. Fraunhofer descobriu que os espectros da luz solar tinham finas linhas escuras em frequências específicas, como códigos de barras cosmológicos. Dois outros cientistas alemães, Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen, mostraram depois no laboratório que determinados elementos emitem ou absorvem energia luminosa em frequências específicas. Parecia que as linhas escuras resultavam da absorção da luz do núcleo do Sol por átomos de diferentes elementos nas regiões externas mais frias do Sol. Isso reduzia a energia nessas frequências, deixando linhas escuras no espectro da emissão. Chamamos essas linhas escuras de *linhas de absorção*, e elementos diferentes geram padrões diferentes de linhas de absorção. Por exemplo, existem linhas que são típicas do carbono e do ferro. Se a luz das estrelas desvia para o vermelho, então todas essas linhas se deslocam para a extremidade vermelha do espectro, e podemos até medir exatamente esse desvio. É o equivalente para o astrônomo de um radar da polícia rodoviária.

No início do século XX, o astrônomo americano Vesto Slipher usou essas técnicas para mostrar que um número surpreendente de objetos astronômicos desviava para o vermelho — ou seja, eles estavam se afastando da Terra, e muito rapidamente. Essa dispersão era muito estranha. Seu significado real só ficou claro quando outro astrônomo americano, Edwin Hubble, combinou essas descobertas com medidas da distância desses objetos remotos.

Estimar a distância de estrelas e nebulosas é complicado. Em princípio, como os gregos sabiam, se poderia usar o método da paralaxe, como um agrimensor. Ao longo dos meses, enquanto a Terra gira ao

redor do Sol, observa-se se algumas estrelas no céu noturno parecem se mover em relação a outras estrelas. Se o fizerem, pode-se usar a trigonometria para descobrir a distância a que estão. Infelizmente, até Próxima Centauri, a estrela mais próxima, está tão distante (cerca de quatro anos-luz da Terra) que não se consegue detectar nenhum movimento sem equipamentos sofisticados. Foi somente no século XIX que os astrônomos conseguiram medir a distância de estrelas próximas usando a paralaxe. Mas, de qualquer modo, os objetos que Vestu Slipher estudava eram muito mais distantes.

Felizmente, no início do século XX, Henrietta Leavitt, uma astrônoma do Observatório de Harvard, encontrou uma maneira de medir a distância de estrelas e nebulosas remotas usando um tipo particular de estrela conhecida como variável cefeida, uma estrela cujo brilho varia com grande regularidade (a Polaris, ou Estrela Polar, é uma cefeida). Ela encontrou uma correlação simples entre a frequência das variações e a luminosidade ou brilho da estrela, de tal modo que pôde calcular o brilho absoluto de uma cefeida. Então, comparando isso com o brilho aparente que a estrela tinha quando vista da Terra, Leavitt conseguiu calcular a distância a que ela estava, porque a quantidade de luz de uma estrela diminui pelo quadrado da distância pela qual ela viaja. Essa técnica maravilhosa forneceu as velas astronômicas-padrão de que Edwin Hubble precisava para fazer duas descobertas profundas sobre o nosso universo.

No início do século XX, a maioria dos astrônomos acreditava que todo o universo estava contido em nossa galáxia, a Via Láctea. Em 1923, Hubble usou um dos telescópios mais poderosos do mundo, no Observatório de Monte Wilson, em Los Angeles, para mostrar que as variáveis cefeidas na então chamada nebulosa de Andrômeda estavam

tão distantes que não podiam estar em nossa própria galáxia. Isso provou o que alguns astrônomos haviam suspeitado: o universo era muito maior do que a Via Láctea e consistia em muitas galáxias, não apenas da nossa.

Hubble fez uma descoberta ainda mais espantosa quando começou a medir a distância de um grande número de objetos distantes usando variáveis cefeidas. Em 1929, ele demonstrou que quase todas as galáxias pareciam estar se afastando de nós e que os objetos mais remotos pareciam ter os maiores desvios vermelhos. Em outras palavras, quanto mais distante um objeto estava, mais rápido estava se afastando. E *isso* parecia significar que todo o universo estava se expandindo. O astrônomo belga Georges Lemaître já suspeitava disso por razões puramente teóricas. E, como ele apontou, se o universo estava se expandindo atualmente, em algum momento no passado tudo nele devia ter estado comprimido num espaço minúsculo, algo que ele descreveu como o *átomo primordial*.

A maioria dos astrônomos ficou chocada com a ideia de um universo em expansão e presumiu que havia um erro nos cálculos de Hubble. O próprio Hubble não tinha certeza disso, e Einstein estava tão convencido de que o universo era estável que manipulou as equações da relatividade geral, de modo que previssem um universo estável, com o acréscimo do que chamava de *constante cosmológica*.

Em parte, o ceticismo dos astrônomos se justificava porque havia de fato problemas nas estimativas de Hubble. Ele calculou que a expansão do universo começara havia apenas 2 bilhões de anos, mas os astrônomos já sabiam que a Terra e o sistema solar eram muito mais antigos do que isso. Por isso, durante várias décadas, a maioria dos astrônomos considerou intrigante, mas provavelmente errada, a ideia de um universo em expansão. Muitos preferiram a ideia alternativa de um

universo em estado estacionário, proposta em 1948 por Hermann Bondi, Thomas Gold e Fred Hoyle. Sim, concordavam os defensores do universo estacionário, as galáxias pareciam estar se afastando, mas matéria nova estava sendo criada ao mesmo tempo, então, em grande escala, o universo permanecia mais ou menos na mesma densidade e pouco mudava.

Porém as evidências acabaram por inclinar a balança a favor de um universo em expansão. Na década de 1940, Walter Baade, pesquisando no mesmo Observatório do Monte Wilson em que Hubble havia trabalhado, mostrou que havia dois tipos de estrelas variáveis cefeidas, e elas produziam diferentes estimativas de distância. Os cálculos revisados de Baade sugeriram que o big bang poderia ter acontecido havia mais de 10 bilhões de anos (as melhores estimativas atuais sugerem que isso ocorreu há 13,82 bilhões de anos). Isso eliminou o problema da cronologia. Hoje não conhecemos nenhum objeto astronômico com mais de 13,82 bilhões de anos, o que é um forte argumento em favor da cosmologia do big bang. Afinal, se o universo fosse imutável e eterno, deveria haver muitos objetos com mais de 13,8 bilhões de anos.

A evidência decisiva veio em meados da década de 1960 e envolveu a descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMBR). Trata-se da radiação liberada quando os primeiros átomos se formaram, cerca de 380 mil anos após o big bang. A CMBR acabou por ser a prova crucial de um universo em expansão. Por quê?

Na década de 1940, alguns astrônomos e físicos ficaram tão impressionados com os dados de Hubble que tentaram descobrir o que poderia ter acontecido se realmente tivesse havido um big bang. Como teria sido o universo no começo se tudo estivesse comprimido num átomo primordial? Se Hubble e Lemaître estivessem certos, o universo

inicial teria sido extremamente denso e quente, e deveria estar se expandindo e esfriando rapidamente. Como matéria e energia se comportariam em condições tão extremas? Durante a Segunda Guerra Mundial, o Projeto Manhattan para construir uma bomba atômica incentivara a pesquisa sobre a física de temperaturas muito altas. No final da década de 1940, o físico russo George Gamow usou insights do Projeto Manhattan para descobrir o que provavelmente acontecera no universo logo após o big bang. Com seu colega Ralph Alpher, ele previu que o universo teria esfriado o suficiente para formar átomos, e, quando os primeiros átomos se formaram, deveria ter havido uma enorme liberação de energia à medida que os fótons escapavam do plasma carregado da era pré-atômica e começavam a fluir livremente através de um universo eletricamente neutro. Além disso, eles sustentaram que esse lampejo de energia ainda deveria ser detectável, embora sua frequência tivesse caído para perto de zero à medida que se estendia através de um universo em expansão. Se os cientistas olhassem cuidadosamente, encontrariam radiação a temperaturas próximas do zero absoluto vindo de todas as direções. Para muitos, isso parecia uma ideia maluca, motivo pelo qual ninguém começou a procurar radiação de baixa temperatura permeando todo o universo.

Em 1964, o flash de radiação de Gamow foi detectado por acidente. Nos laboratórios Bell, em Holmdel, Nova Jersey, os radioastrônomos Arno Penzias e Robert Wilson estavam construindo uma antena de rádio de alta precisão para se comunicar com satélites artificiais. Para eliminarem a interferência, eles resfriavam o receptor a cerca de 3,5 graus Celsius acima do zero absoluto, mas ainda havia um zumbido intrigante de energia de baixa temperatura. Parecia vir de todas as direções, então eles sabiam que não era de uma explosão estelar massiva. Suspeitando de

uma falha no receptor, eles removeram um par de pombos empoleirados na antena em forma de chifre e limpavam as fezes, mas isso não fez diferença. (Infelizmente, os pombos continuaram tentando voltar para a antena e foi preciso abatê-los.) Perto dali, em Princeton, uma equipe de astrônomos liderados por Robert Dicke começara a procurar a radiação de fundo de Gamow quando ouviram o que Penzias e Wilson tinham encontrado. Eles imediatamente perceberam que haviam perdido o furo científico. As duas equipes decidiram colaborar em trabalhos descrevendo a descoberta. Eles argumentaram que se tratava provavelmente da energia de imediatamente após o big bang que Gamow havia previsto.

A descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas persuadiu a maioria dos astrônomos de que o big bang era real porque nenhuma outra teoria poderia explicar essa radiação que permeia tudo. Fazer uma previsão estranha, mas em última análise bem-sucedida como essa, é uma das formas mais poderosas de persuadir os cientistas de que sua teoria é sólida. O universo, na verdade, estava se expandindo, e realmente foi criado em um big bang.

Hoje, as evidências de que nosso universo começou num big bang são esmagadoras. Muitos detalhes ainda precisam ser aprofundados, mas, por enquanto, a ideia central está firmemente estabelecida como o primeiro capítulo de uma história moderna das origens. Essa é a inicialização. E, assim como a física quântica permite que as coisas apareçam de um vácuo, parece que o universo inteiro realmente surgiu de uma espécie de nada cheio de potencial.<sup>14</sup>

---

\* Tradução de Paulo Geiger (São Paulo: Companhia das Letras, 2017).

\*\* No original: “*So it must have been after the birth of the simple light/ In the first, spinning place, the spellbound horses walking warm/ Out of the whinnying green stable/ On to the fields of praise.*” A

tradução é de Ivan Junqueira, em *Dylan Thomas, Poemas reunidos 1934-1953* (Rio de Janeiro: José Olympio, 2003). (N. T.)

## 2. Estrelas e galáxias: limiares 2 e 3

*A humanidade é feita da substância das estrelas.*

Harlow Shapley, *Vista de uma estrela distante*

O big bang nos deu um universo, mas por várias centenas de milhões de anos esse foi um universo extremamente simples. Sob a superfície, no entanto, novas possibilidades interessantes se agitavam e, finalmente, estrelas e galáxias começaram a iluminar a escuridão. Elas acrescentaram um elenco de personagens totalmente novo, novas propriedades emergentes e novas formas de complexidade, e conduziram o universo através de um segundo limiar de complexidade crescente. Para explicar como esses objetos majestosos surgiram, precisamos voltar ao começo.

## ENERGIA LIVRE: O MOTOR DA COMPLEXIDADE

Nos segundos e minutos após o big bang, o universo estava em queda livre termodinâmica. Por alguns momentos ofuscantes, houve energia suficiente para fazer e desfazer novas formas exóticas de energia e matéria. Mas, à medida que as temperaturas despencavam, a energia e a matéria se congelavam em algumas estruturas simples. No forno do big bang, forças e partículas se estabilizaram como cerâmica queimada. Juntas, as energias violentas do big bang e algumas regras operacionais simples criaram estruturas como prótons e elétrons que se mostrariam notavelmente estáveis, porque as temperaturas que as criaram raramente voltariam a aparecer em um universo em resfriamento.

Então reduziu-se a rapidez da queda, como se o universo estivesse caindo de uma montanha termodinâmica em um vale. Os gradientes se aplainaram, as temperaturas caíram de forma menos abrupta e o ritmo da mudança diminuiu à medida que a face termodinâmica do penhasco do início do universo dava lugar a uma paisagem ondulante e plana na qual as temperaturas podiam subir e descer. Tornou-se mais difícil fixar novas estruturas porque elas podiam se desfazer com aumentos modestos de calor. Os átomos, por exemplo, se desfizeram dentro das primeiras estrelas quando as temperaturas subiram acima de cerca de 10 mil graus Celsius.

Nesses ambientes menos previsíveis, as estruturas complexas precisavam de apoio extra para se estabilizarem. Esse suporte foi fornecido por fluxos de energia controlados e não aleatórios. As estrelas são mantidas juntas por fluxos de energia gerados em seus núcleos. Os organismos vivos, inclusive você e eu, são mantidos inteiros por fluxos

de energia delicados e dirigidos com precisão, administrados por intrincados processos metabólicos em nossas células. Em um universo pós-big bang, é preciso trabalhar para construir e manter novas estruturas complexas. É por isso que existe uma ligação profunda entre forma, complexidade e fluxos de energia direcionados ou estruturados.

*Fluxos estruturados de energia* é uma descrição intuitiva, não um jargão científico. Mas eis a ideia da qual ela se aproxima: a teoria termodinâmica distingue entre fluxos de energia que são completamente aleatórios e fluxos de energia que têm direção, estrutura e coerência para que possam trabalhar. Fluxos estruturados de energia são conhecidos como *energia livre*, e fluxos não estruturados são conhecidos como *energia térmica*. A diferença não é absoluta. Estamos falando de graus de coerência ou aleatoriedade. No entanto, a distinção entre energia livre e energia térmica é fundamental para a nossa história das origens.

A primeira lei da termodinâmica nos diz que a quantidade total de energia no universo nunca muda. Ela é conservada. Nosso universo parece ter chegado com um *potencial fixo para as coisas acontecerem*. Então, a primeira lei está realmente nos falando sobre o oceano primordial de possibilidades. A segunda lei da termodinâmica nos diz que as coisas que emergem do oceano de possibilidades podem ser mais ou menos estruturadas, como as marolas de um riacho. Mas devemos esperar que a maioria delas seja menos estruturada e se torne ainda menos estruturada ao longo do tempo. Isso ocorre porque a maioria dos arranjos possíveis de matéria e energia tem pouca ou nenhuma estrutura, e, se por acaso você encontrar uma estrutura, espere que ela se decomponha rapidamente.

Uma cachoeira é uma boa ilustração. Aqui, temos muita estrutura, mas ela acabará se dissipando. As moléculas de água no topo das quedas

não se movem aleatoriamente, como moléculas em um pote de ar. Eles se movem na mesma direção, como felinos em ronda, mantendo-se unidas o mais perto possível. Isso porque, ao contrário das moléculas de gás, que se movem como indivíduos, as moléculas líquidas são mantidas juntas pelo eletromagnetismo. Desse modo, a gravidade pode movê-las em formação próxima e na mesma direção, como soldados em marcha. Quando a água escorre pela borda, a energia potencial se transforma em energia cinética, ou energia de movimento. Trata-se de um movimento coordenado numa única direção. Está estruturado, então podemos descrever a energia que o impulsiona como *energia livre*. E a energia livre, ao contrário da energia térmica aleatória das moléculas de gás, pode fazer o trabalho porque tem alguma estrutura e forma e pode empurrar as coisas numa única direção, em vez de empurrá-las de todas as maneiras.<sup>1</sup> Se quiséssemos, poderíamos direcionar esse fluxo de energia livre através de uma turbina e gerar eletricidade. Energia livre é o que faz as coisas. É o coelhinho da pilha Energizer, rápido e incontrolável, de nossa história das origens.

Mas, ao contrário da energia em geral, a energia livre não é conservada. É instável, como uma mola que se desenrola. À medida que trabalha, perde sua estrutura e a capacidade de fazer mais trabalho. Quando a água de uma cachoeira bate nas rochas do fundo, ela se transforma na energia dispersa e incoerente do calor. Cada molécula se agita mais ou menos de forma independente. A energia ainda está lá; ainda é conservada (essa é a primeira lei). Mas as moléculas empurram em tantas direções que sua energia não pode mais mover uma turbina. A energia livre se transformou em energia térmica. A segunda lei da termodinâmica nos diz que, a muito longo prazo, toda a energia livre se transformará em energia térmica.

A energia térmica, como um policial de trânsito bêbado, direciona a energia para todos os lados e cria caos. A energia livre, como um guarda de trânsito sóbrio, direciona energia para rotas específicas e cria ordem. Felizmente para nós, havia alguma energia livre no universo primitivo graças às regras operacionais básicas do nosso universo. Essas regras direcionaram a energia para determinados caminhos não aleatórios e garantiram pelo menos um mínimo de estrutura.

A energia livre impulsionou o surgimento das primeiras grandes estruturas: galáxias e estrelas. A fonte crucial de energia livre para essa parte de nossa história das origens foi a gravidade. Como um cão pastor cosmológico, a gravidade gosta de agrupar coisas. E as coisas que ela agrupou foram as formas simples de matéria criadas no big bang. Juntas, gravidade e matéria forneceram as condições Cachinhos Dourados para o surgimento de estrelas e galáxias.

Estudos da radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMBR) mostram que, no universo inicial, havia pouca estrutura em grandes escalas. Pense numa fina névoa de átomos de hidrogênio e hélio flutuando em um banho morno de matéria escura permeada de fótons de luz. E tudo isso sob mais ou menos a mesma temperatura. Sabemos que o universo primordial era homogêneo porque podemos medir diferenças de temperatura na CMBR, e descobrimos que as partes mais quentes do universo primitivo eram apenas cerca de um centésimo de grau mais quentes que as partes mais frias. Nenhum gradiente de temperatura utilizável aqui, nenhuma cascata de energia que pudesse construir novas estruturas. Você pode gerar uma diferença de temperatura muito maior agora, esfregando o dedo no rosto.

Então a gravidade começou a moldar esse material pouco promissor em algo mais interessante. Enquanto o big bang estava separando o espaço, a gravidade se movimentava tentando juntar energia e matéria.

A ideia da gravidade era fundamental para a compreensão que Newton tinha do universo e forneceu uma das ideias unificadoras da Revolução Científica. Newton explicou como a gravidade funciona em

uma das mais importantes obras científicas de todos os tempos: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Princípios matemáticos da filosofia natural*), publicado em 1687. Newton considerava a gravidade uma força universal de atração que agia entre todas as massas. Dois séculos e meio depois, Einstein mostrou que a energia também podia exercer uma atração gravitacional, porque é de energia que a matéria é feita.

Einstein fez outra importante previsão sobre a gravidade: era uma forma de energia e, portanto, como o eletromagnetismo ou o som, deveria gerar ondas. Mas Einstein temia que as ondas fossem tão minúsculas que ninguém jamais as detectaria. Em setembro de 2015, em uma bela demonstração de ciência na sua melhor forma, ondas de gravidade foram finalmente detectadas por duas enormes máquinas, uma na Louisiana e outra no estado de Washington, operadas pelo Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser (LIGO). Em 2017, três dos homens que contribuíram significativamente para o projeto receberam o prêmio Nobel de física. As ondas gravitacionais que o LIGO detectou foram geradas há cerca de 100 milhões de anos, quando dois buracos negros colidiram em uma galáxia distante em algum lugar nos céus do sul. (Quando colidiram, os dinossauros ainda dominavam nosso planeta.) Na Terra, cada máquina LIGO dividiu feixes de luz em dois e os enviou perpendicularmente um ao outro para cima e para baixo em dois tubos de quatro quilômetros com espelhos em cada extremidade. Quando voltaram depois de quase trezentas viagens, eles não chegaram exatamente no mesmo horário. Pequenas ondas gravitacionais estenderam os tubos em uma direção e os encolheram na outra por uma distância muito menor do que a largura de um próton. Agora que sabem que ondas gravitacionais existem, os astrônomos estão

esperançosos de que poderão usá-las para estudar o universo de novas maneiras.

Do ponto de vista da gravidade, o universo primitivo era muito fluido e suave. Ele precisava ser agrupado. Essa tendência da gravidade de rearranjar o universo explica por que podemos pensar no universo inicial como tendo baixa entropia, uma espécie de arrumação que a entropia poderia bagunçar nos próximos bilhões de anos. Depois que começou, a gravidade levou apenas algumas centenas de milhões de anos para transformar a névoa de partículas fluidas do universo primordial num espaço mais bagunçado e encaroçado, cheio de estrelas e galáxias.

Como Newton mostrou, a força da gravidade aumenta onde há mais massa e onde as coisas estão mais próximas. É por isso que a Terra exerce uma atração gravitacional muito maior sobre os objetos do que nós, e é também por isso que ela nos puxa com muito mais delicadeza se estivermos mais distantes de sua superfície — digamos, na Estação Espacial Internacional. Agora, concentremo-nos em um pequeno cubo da névoa de partículas do início do universo. Imaginemos que, de maneira bastante aleatória, a matéria escura e os átomos estão um pouco mais concentrados em um canto do cubo do que em outro. As leis de Newton nos dizem que a gravidade será mais forte no canto mais denso, onde então a matéria será unida com mais vigor, e a diferença entre regiões mais densas e mais vazias será ampliada. Desse modo, cubo a cubo, a gravidade tornou o universo mais granulado e agrupado ao longo de milhões de anos.

À medida que a gravidade forçava os átomos a ficarem juntos, eles colidiam com mais frequência e se agitavam de modo mais frenético. Isso elevou a temperatura nas regiões mais agrupadas, à medida que mais calor se concentrava em menores volumes de espaço. (O mesmo

princípio explica por que um pneu fica mais quente quando o enchemos.) Enquanto a maior parte do universo continuava esfriando, os pedacinhos agrupados começaram a esquentar novamente. Por fim, alguns aglomerados ficaram tão quentes que os prótons não conseguiram mais segurar seus elétrons. Os átomos se separaram, recriando dentro de cada aglomerado o plasma carregado, crepitante de eletricidade, que outrora permeava todo o universo.

À medida que a gravidade acumulava pressão, regiões mais densas se tornavam ainda mais densas, seus núcleos ficaram mais quentes e a gravidade começou a recriar as altas energias do universo primitivo. A aproximadamente 10 milhões de graus Celsius, os prótons têm tanta energia que podem colidir com violência suficiente para superar a repulsa de suas cargas positivas. Uma vez empurrados através dessa barreira, os prótons começaram a se unir em pares, unidos pela potente força nuclear, que age apenas em distâncias minúsculas. Os pares de prótons formaram núcleos de hélio como haviam feito, brevemente, uma vez antes, logo após o big bang.

Quando os prótons se fundiram, parte de sua massa se transformou em pura energia e, como vimos, até mesmo um pouquinho de matéria contém uma quantidade colossal de energia. As mesmas energias enormes são liberadas pelas bombas H, que são movidas, como todas as estrelas, por fusão. Assim, à medida que o núcleo de uma nuvem densa de matéria atravessa o limiar crítico de cerca de 10 milhões de graus, trilhões de prótons começam a se fundir em núcleos de hélio, criando uma fornalha que libera quantidades colossais de energia. Uma vez aceso, o forno continuará queimando enquanto houver prótons livres suficientes para a fusão continuar.

As enormes energias liberadas pela fusão aquecerão o núcleo de tal modo que ele se expande e rechaça a gravidade. Agora toda a nova estrutura se estabilizará por milhões ou bilhões de anos. Nasceu uma estrela.

## UM UNIVERSO COM GALÁXIAS E ESTRELAS

Mas não apenas uma estrela; em cada região fragmentada, havia bilhões de estrelas, e agora as vastas cidades estelares que chamamos de galáxias começaram a brilhar, iluminando a escuridão do jovem universo.

Esse universo com galáxias e estrelas é muito diferente do universo dos primeiros átomos. Agora, ele tem estrutura em escala grande e também pequena, e podemos dizer que todo o universo é mais complexo. Há áreas escuras e vazias entre as galáxias e áreas densas e brilhantes dentro das galáxias. As galáxias estão cheias de matéria e energia, enquanto o espaço entre elas é frio e vazio. Não mais espalhada como uma névoa, a coisa interessante concentra-se em grandes lençóis e filamentos de galáxias, mais ou menos como os fios de uma teia de aranha. Cada galáxia tem uma determinada estrutura. A maioria são galáxias espiraladas, como a nossa Via Láctea, com centenas de bilhões de estrelas girando lentamente em torno de um núcleo denso no qual normalmente existe um buraco negro. Mas as galáxias que colidiam com outras galáxias muitas vezes se bagunçavam e formavam “galáxias irregulares”. As galáxias, por sua vez, eram ligadas pela gravidade em aglomerados e em aglomerados de aglomerados, criando arquipélagos estelares que se estendiam por todo o universo.

Espalhadas pelo universo, como passas quentes num pudim frio, existem estrelas individuais que também têm muita estrutura e novas propriedades emergentes. Cada estrela tem um núcleo quente no qual os prótons se fundem, gerando energia que rechaça a gravidade. Acima do núcleo, as camadas externas pressionam para baixo e fornecem

combustível de prótons. A história de vida da estrela dependerá principalmente da sua massa no nascimento: a quantidade de matéria que contém no início. Estrelas enormes geram mais pressão gravitacional, então são muito mais quentes do que estrelas com menos massa. Isso explica por que elas queimam seu combustível rapidamente e desligam em poucos milhões de anos. Estrelas com menos massa queimam de modo mais lento, e muitas estrelas pequenas continuarão queimando por muito mais tempo do que a idade atual do universo.

Esse universo mais diversificado tinha ambientes mais variados, maior potencial criativo e muitos gradientes de energia. Havia gradientes de luz, temperatura e densidade, pelos quais a energia livre fluía, como a água sobre uma cachoeira. Cada estrela derramava energia nos espaços frios em torno dela, gerando fluxos de calor, luz e energia química que podiam ser usados para construir novas formas de complexidade nas regiões próximas. Esses são os fluxos de energia livre que permitem que a vida floresça aqui no planeta Terra.

A gravidade deu partida à transformação da matéria em estrelas ao fundir prótons, apesar da barreira criada por suas cargas positivas. Trata-se de um padrão que veremos se repetir muitas vezes. É um pouco como a xícara de café que nos ajuda a sair de casa pela manhã. Os químicos referem-se a essa injeção inicial de energia como energia de *ativação*; é a energia de um fósforo aceso que inicia uma conflagração. Um tipo de energia muda alguma coisa para liberar outros fluxos de energia livre que são muito maiores do que a energia de ativação. Na história da formação estelar, a gravidade forneceu a energia de ativação para a fusão e formação de estrelas e para tudo o que veio depois.

Mas há um enigma aqui. E a segunda lei da termodinâmica? A entropia detesta estruturas, então por que permite o aparecimento de

coisas mais complexas?

Se olharmos de perto para os fluxos de energia, veremos que estruturas complexas, como as estrelas, pagam caro por sua complexidade. Veja toda a energia da fusão. A primeira coisa que a energia faz é sustentar a estrela, evitando que ela entre em colapso. Isso é um pouco como uma taxa paga à entropia, uma espécie de imposto de complexidade. Quando a estrela parar de gerar energia, ela entrará em colapso. A ideia da taxa de complexidade ajuda a explicar um fenômeno importante observado pelo astrofísico Eric Chaisson: grosso modo, fenômenos mais complexos precisam de fluxos de energia mais densos, mais energia por grama por segundo. Ele estima, por exemplo, que a densidade da energia que flui através da sociedade humana moderna é cerca de 1 milhão de vezes maior do que a densidade de energia que flui através do Sol, enquanto a energia que flui através da maioria dos organismos vivos está em algum lugar entre esses extremos. É como se a entropia exigisse mais energia de uma entidade se ela tentasse se tornar mais complexa; coisas mais complexas precisam encontrar e gerir fluxos maiores e mais elaborados de energia livre. Não admira que seja mais difícil criar e manter coisas mais complexas, e não é de admirar que elas geralmente se destruam mais rápido do que coisas mais simples. Essa é uma ideia que perpassa a história moderna das origens e tem muito a nos dizer sobre as sociedades humanas modernas.<sup>2</sup>

A entropia adora esse acordo porque a energia que sustenta uma estrela, como a energia de uma cachoeira, acaba se degradando quando é liberada no espaço. Assim, enquanto se torna mais complexa, a estrela também ajuda a entropia a degradar a energia livre em energia térmica. Trata-se de algo que veremos ao longo da história moderna das origens. A complexidade crescente não é um triunfo sobre a entropia.

Paradoxalmente, os fluxos de energia que sustentam coisas complexas (inclusive você e eu) estão ajudando a entropia com sua nefasta tarefa de destruir lentamente todas as formas de ordem e estrutura.

Um bilhão de anos após o big bang, o universo, tal como uma criança pequena, já estava se comportando de maneira interessante. Mas, quimicamente falando, era muito chato. Continha apenas hidrogênio e hélio. Nosso terceiro limiar de complexidade crescente produziu novas formas de matéria: todos os outros elementos da tabela periódica. Um universo com mais de noventa elementos distintos poderia fazer muito mais do que um universo com apenas hidrogênio e hélio.

Hidrogênio e hélio foram os primeiros elementos a serem produzidos porque são os mais simples. O hidrogênio tem um próton em seu núcleo, então dizemos que ele tem número atômico 1. O hélio tem dois prótons em seu núcleo, então seu número atômico é 2. Quando a CMBR foi emitida, cerca de 380 mil anos após o big bang, houve também uma aspersão de lítio (número atômico 3) e berílio (número atômico 4). E foi isso. Esses foram os únicos elementos criados no big bang.

As condições Cachinhos Dourados para criar mais elementos com núcleos maiores eram simples: muitos prótons e temperaturas muito altas, temperaturas que não existiam desde o instante logo após o big bang. Essas temperaturas seriam criadas dentro do mundo dramático e conflituoso de estrelas agonizantes, à medida que se cansavam, cambaleavam e, por fim, desmoronavam, incapazes de pagar impostos sobre a complexidade da entropia.

Para entendermos como as estrelas fabricam novos elementos em sua agonia, precisamos entender como elas vivem e envelhecem.

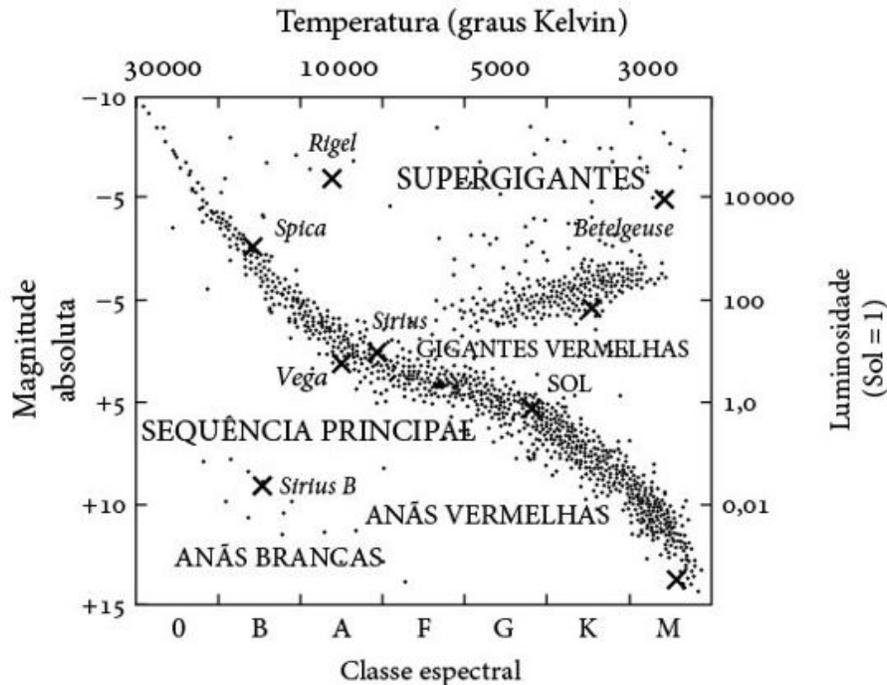
As estrelas vivem por milhões ou bilhões de anos, então não podemos observá-las envelhecendo. É por isso que a história moderna de sua vida

e morte não poderia ter sido contada por astrônomos a olho nu, como os maias ou o povo do lago Mungo, ou da Atenas antiga. Nosso entendimento moderno baseia-se em pesquisas de todo o mundo que usam instrumentos e armazenamentos de dados criados apenas nos últimos dois séculos. São eles que possibilitam que os astrônomos modernos compartilhem informações sobre milhões de estrelas em diferentes fases de suas vidas. Como disse o astrônomo inglês Arthur Eddington, a astronomia é como caminhar por uma floresta com mudas, árvores maduras e outras próximas da morte.<sup>3</sup> Ao estudar árvores em diferentes pontos de seus ciclos de vida, podemos descobrir como elas crescem, amadurecem e morrem.

Para os astrônomos, existe um mapa fundamental que reúne uma enorme quantidade de informações sobre as estrelas: o diagrama de Hertzsprung-Russell. É o equivalente astronômico dos globos que costumavam ficar nas salas de aula da escola e, como esses globos, nos ajuda a dar sentido a muitas informações.

O diagrama de Hertzsprung-Russell, criado por volta de 1910, classifica as estrelas de acordo com duas propriedades básicas. A primeira propriedade, plotada no eixo vertical, é seu brilho ou luminosidade intrínseca — que é na verdade a quantidade de energia que elas enviam para o espaço — em comparação com o Sol. A segunda propriedade é sua cor, que nos informa a temperatura de sua superfície em kelvins (K). Isso é geralmente plotado no eixo horizontal. Uma vez que essas duas quantidades mudam durante a vida de uma estrela, o gráfico pode nos ajudar a entender as biografias de diferentes tipos de estrelas. As principais diferenças nas histórias de vida das estrelas dependem principalmente de mais uma estatística: a massa da nuvem de matéria a

partir da qual se formaram. Estrelas de alta massa têm biografias diferentes das estrelas de baixa massa.<sup>4</sup>



*Diagrama de Hertzsprung-Russell, versão simplificada com posições aproximadas de exemplos de diferentes tipos de estrelas.*

Em um diagrama de Hertzsprung-Russell, as estrelas mais luminosas, aquelas que emitem mais energia, como Sirius, estão perto do topo. São normalmente as estrelas com mais massa. As estrelas menos luminosas, como nossa vizinha Próxima Centauri, estão bem abaixo. Nosso Sol (com luminosidade 1) está no meio. Estrelas com temperaturas de superfície muito altas estão à esquerda e aquelas com baixas temperaturas de superfície estão à direita.

Existem três áreas principais de interesse no diagrama. Na transversal do diagrama, numa ampla faixa em curva que se estende da parte inferior direita para a parte superior esquerda, está a sequência principal.

A maioria das estrelas passará cerca de 90% de sua vida em algum ponto da sequência principal. O local onde ficam depende de sua massa, mas todas as estrelas na sequência principal geram a energia de que precisam fundindo prótons em núcleos de hélio. E é isso que o nosso Sol está fazendo neste exato momento. Ele é de meia-idade e ainda está na sequência principal. No canto superior direito do diagrama, encontram-se as gigantes vermelhas, como Betelgeuse, que fica em um dos cantos da constelação de Órion. São estrelas envelhecidas que usaram a maior parte dos prótons em seus núcleos e estão alimentando seus fornos queimando outros núcleos maiores. Elas têm superfícies mais frias porque se expandiram para talvez duzentas vezes o raio do nosso Sol. Mas a quantidade total de luz que emitem é enorme porque são muito grandes, e é por isso que estão próximas do topo do diagrama. A terceira região importante está no canto inferior esquerdo. Ali encontram-se as anãs brancas. Eram gigantes vermelhas até que perderam a maior parte de suas camadas externas, deixando apenas núcleos quentes e densos.

Quando as estrelas ficam muito velhas, acabam por ficar sem prótons livres e seus núcleos começam a se encher de cinzas de prótons fundidos — em outras palavras, núcleos de hélio. A fusão de núcleos de hélio requer temperaturas muito mais altas do que a fusão de prótons separados e, por fim, os fornos em seu núcleo param de funcionar. Quando isso acontece, a gravidade toma conta e as estrelas colapsam sob sua própria massa. Mas isso ainda não é o fim da história. Depois que uma estrela entra em colapso, ela se aquece novamente à medida que a gravidade aumenta a pressão. Longe do núcleo, as camadas externas da estrela se expandem e esfriam para manter tudo em equilíbrio. Para nós, essas camadas exteriores mais frias parecem vermelhas, e é por isso que chamamos as estrelas nesse estágio de *gigantes vermelhas*. Quando o

nosso Sol atingir esse estágio, ele se expandirá para cerca de duzentas vezes seu tamanho atual e vaporizará os planetas mais próximos, inclusive a Terra.

Se a gigante vermelha tiver massa suficiente, a gravidade a comprimirá com tanta força que seu núcleo ficará mais quente do que nunca, quente o suficiente para começar a fundir núcleos de hélio em núcleos mais pesados, como carbono (com seis prótons) e oxigênio (com oito prótons). A estrela ressuscitou, mas fundir núcleos de hélio é um processo mais complicado do que fundir prótons e gera menos energia, então as estrelas nesse estágio têm uma expectativa de vida muito menor. Estrelas muito grandes passarão por vários estágios de expansão e contração cada vez mais frenéticos. Carbono e oxigênio se fundirão para formar elementos do magnésio ao silício e finalmente ferro. Enquanto as estrelas esquentam, outro mecanismo entra em ação, transformando alguns nêutrons em prótons para criar novos tipos de núcleos. O núcleo se tornará gradualmente uma enorme bola de ferro cercada por camadas de outros elementos.

E esse é o fim da estrada, porque não se pode gerar energia fundindo núcleos de ferro. Eventualmente, a maioria das estrelas destruirá suas camadas externas e acabará como anãs brancas, que estão no canto inferior esquerdo do diagrama de Hertzsprung-Russell. Anãs brancas são zumbis estelares, sem forno em seu coração. Elas são extremamente densas, com frequência do tamanho da Terra, mas com a massa do Sol. Se tentássemos erguer uma colher de chá de material de uma anã branca, não conseguiríamos, porque pesa pelo menos uma tonelada.<sup>5</sup> Embora ainda estejam quentes, seus cadáveres esfriam durante bilhões de anos. Mas fizeram seu trabalho fertilizando seu entorno com novos elementos. Algumas anãs brancas morrem de forma mais espetacular em vastas

explosões de supernovas se forem sugadas por estrelas próximas. Essas explosões são tão quentes que podem criar muitos dos elementos da tabela periódica. A espetacular morte por explosões de anãs brancas gera o que é conhecido como supernovas de tipo 1a. Todas elas explodem na mesma temperatura, então, ao vermos uma delas, sabemos quão brilhante ela é, e isso significa que podemos estimar a sua verdadeira distância. As supernovas de tipo 1a permitem que os astrônomos calculem distâncias centenas de vezes maiores do que as variáveis cefeidas.

Estrelas com massa mais de sete vezes maior que a do nosso Sol também acabarão a vida de forma espetacular em outro tipo de explosão, conhecida como supernova de colapso do núcleo. Quando o núcleo forma uma bola de ferro maior que o nosso Sol, o forno central é desligado pela última vez. A gravidade esmagará o núcleo em uma fração de segundo e com extrema violência, criando as energias e temperaturas mais altas da vida de uma estrela. Ela explodirá em uma supernova e poderá emitir brevemente tanta energia quanto uma galáxia inteira. Em poucos minutos, ela fabrica muitos dos elementos remanescentes da tabela periódica e lança-os no espaço. O exemplo mais famoso de uma supernova de colapso do núcleo talvez esteja no centro da nebulosa do Caranguejo. Betelgeuse pode tornar-se uma supernova a qualquer momento nos próximos milhões de anos.

A maioria das supergigantes, tendo explodido suas camadas externas e formado supernovas, se contrairá de modo tão violento que prótons e elétrons serão esmagados juntos para formar nêutrons. Então, toda a bolha maciça é esmagada para formar uma *estrela de nêutrons*, um objeto feito de nêutrons agrupados tão próximos quanto as partículas em um núcleo atômico. Essa é uma forma muito incomum e extremamente

densa de matéria, pois a maioria dos átomos consiste principalmente em espaço vazio. Uma estrela de nêutrons de apenas vinte quilômetros de diâmetro pesaria o dobro do nosso Sol, e uma colher de chá de matéria de estrelas de nêutrons pesaria 1 bilhão de toneladas.<sup>6</sup> Há certos indícios de que muitos dos elementos mais pesados da tabela periódica possam ter sido formados não em supernovas-padrão, mas durante violentas fusões de estrelas de nêutrons.

Estrelas de nêutrons giram rapidamente, como faróis de alerta, e foram detectadas pela primeira vez em 1967 a partir de uma série de rápidos lampejos de energia. Estrelas de nêutrons rotativas são conhecidas como pulsares. Logo depois que o primeiro pulsar foi descoberto, outro foi detectado no centro da nebulosa do Caranguejo, remanescente de uma supernova observada pelos astrônomos chineses no ano de 1054. O pulsar da nebulosa do Caranguejo tem aproximadamente o tamanho de uma cidade e gira trinta vezes por segundo.

Para as estrelas com mais massa, há outro desfecho ainda mais estranho. Seus núcleos implodem de modo tão violento que nada pode resistir ao colapso, e elas se transformam em buracos negros, os objetos mais densos que conhecemos. Einstein previu a existência de buracos negros, objetos tão densos que nada pode escapar de sua atração gravitacional, nem mesmo a luz, e é por isso que sabemos tão pouco sobre suas entranhas. Os buracos negros são monstros astronômicos muito estranhos, mas agora temos muitas provas de que são reais. As primeiras estrelas em nosso universo eram provavelmente enormes, por isso é provável que muitas colapsaram em grandes buracos negros, e estes podem ter fornecido as sementes gravitacionais em torno das quais galáxias inteiras se formaram, como pérolas ao redor de grãos de areia.

Hoje, os astrônomos são capazes de detectar grandes buracos negros nos centros da maioria das galáxias, inclusive da nossa. Seus enormes campos gravitacionais podem sugar estrelas próximas para dentro de suas mandíbulas. Quando uma estrela é puxada através da borda de um buraco negro (seu horizonte de eventos), ela emite enormes quantidades de energia numa espécie de grito de morte. Esses gritos agonizantes dão origem a objetos excepcionalmente brilhantes conhecidos como quasares.

A borda, ou horizonte de eventos, de um buraco negro é um ponto sem retorno. Ele representa um limite para o nosso conhecimento, porque muito pouca informação pode escapar das garras de um buraco negro. Podemos estimar a massa do objeto que formou um buraco negro, assim como sua rotação. Mas não muito mais que isso. Não obstante, Stephen Hawking mostrou que efeitos quânticos sutis permitem que pequenas quantidades de energia vazem dos buracos negros. Talvez estejam também vazando informações, mas, se for o caso, ainda não sabemos como lê-las.

Dessas diferentes maneiras, as estrelas moribundas enriqueceram e fertilizaram o jovem universo. Uma vez forjadas em estrelas e supernovas agonizantes, os elementos da tabela periódica se reuniram em enormes nuvens de poeira entre as estrelas; átomos se combinaram para formar moléculas simples e, por meio de uma espécie de fermentação, produziram novas formas de matéria.

Sabemos tudo isso sobre estrelas porque os astrônomos desenvolveram técnicas para determinar o que está acontecendo dentro de estrelas que estão a milhões de anos-luz da Terra. Já vimos a quantidade de informações que os astrônomos podem arrancar da luz das estrelas. Mas a luz visível representa apenas uma pequenina porção

das energias emitidas por estrelas e galáxias. Os telescópios modernos permitem que os astrônomos estudem as emissões em todas as frequências do espectro eletromagnético, desde as mais longas e preguiçosas ondas de rádio até os minúsculos e hiperativos raios gama. Os computadores possibilitam o processamento de enormes quantidades de informação com grande precisão, e telescópios baseados no espaço, como o Hubble, permitem que os astrônomos observem o universo livre das distorções criadas pela atmosfera da Terra. Esses brinquedos científicos modernos nos dizem muitíssimo sobre o nosso ambiente galáctico.

Instrumentos mais antigos, como telescópios e espectroscópios ópticos, também foram imensamente importantes. As linhas de absorção reveladas pelos espectroscópios nos dizem quais são os elementos que estão dentro das estrelas e em que proporções. Quer saber quanto ouro existe no Sol? Aponte um espectroscópio para ele, estude as linhas de absorção de ouro e meça o quanto elas são escuras. Descobrirá que o ouro representa menos de um trilionésimo da massa do Sol. Mas o Sol é tão grande que extrair todo esse ouro deixaria qualquer um extremamente rico, porque renderia muito mais ouro do que existe no planeta Terra.

Os astrônomos podem saber a temperatura da superfície de uma estrela a partir da cor (ou frequência) da luz que emite, por isso sabemos que a temperatura da superfície pode ser tão baixa quanto 2500 K e tão alta quanto 30000 K. E, como já vimos, eles são capazes de calcular a *quantidade* total de luz que uma estrela emite (sua luminosidade) medindo seu brilho *aparente* e, em seguida, calculando quanto mais brilhante ela seria de perto. Essas duas medições — temperatura da superfície e luminosidade — fornecem os dados básicos para o diagrama

de Hertzsprung-Russell. Por fim, se soubermos a luminosidade de uma estrela, podemos muitas vezes estimar sua massa. Técnicas semelhantes nos ajudam a estimar a distância, o tamanho, o movimento e a energia de galáxias inteiras.

Essas técnicas revolucionaram nossa compreensão das estrelas e galáxias nos últimos cinquenta anos. Elas nos ajudaram a entender a evolução das estrelas e galáxias, como elas se desintegram e como criaram um universo quimicamente rico. E essa foi a condição crucial para construir moléculas complexas que pudessem formar novos tipos de objetos astronômicos, como nossa Terra e sua Lua.

### 3. Moléculas e luas: limiar 4

*Na verdade, existem apenas átomos e o vazio.*

Demócrito

*Você está na Terra. Não há cura para isso.*

Samuel Beckett, *Fim de jogo*

## DE POEIRA ESTELAR A MOLÉCULAS

Até agora, vimos como processos violentos, usando energias extremas e guiados pelas regras operacionais básicas do universo, criaram galáxias, estrelas e novos elementos. Fizeram isso com o equivalente cosmológico da escultura feita por motosserra, e a gravidade é um virtuose desse tipo de escultura. Perto das estrelas, essa escultura grosseira propiciou novos ambientes nos quais se tornaram possíveis esculturas mais delicadas. Para entender esses novos tipos de estruturas, precisamos passar de coisas muito grandes para coisas muito pequenas. Precisamos nos concentrar nas relações entre os átomos.

A complexidade química depende de minúsculos fluxos de energia eletromagnética que podem fazer o nanotrabalho de reorganizar átomos e moléculas individuais. Mas esses fluxos delicados de energia livre são comuns apenas em ambientes Cachinhos Dourados abrigados e raros. Altas temperaturas explodirão moléculas e átomos e, portanto, a complexidade química é impossível dentro de estrelas. Mas a complexidade química requer alguma energia, por isso também é impossível na zona morta do espaço profundo. O ambiente ideal parece ser próximo de uma estrela, mas não perto demais, em regiões com fluxos contínuos, mas suaves, de energia livre.

Nós, seres humanos, sentimos a gravidade, mas, no nanomundo onde se encontram os átomos, a gravidade não é tão importante. Nem importa muito para pequenas coisas como bactérias ou insetos da água, que estão muito mais preocupados com cargas elétricas locais ou com a tensão superficial da água, respectivamente. Na escala de moléculas, a força eletromagnética manda. Trata-se da força que une átomos e

moléculas e os separa. Moléculas e átomos se movem através de um mundo pegajoso de ganchos, sensores, iscas e laços eletromagnéticos.

A química começou dentro das nuvens de poeira galáctica enquanto elas se enchiam de novos elementos. Ainda hoje, em torno de 98% da massa de nuvens de poeira interestelar consiste em hidrogênio e hélio. Mas borrifados entre os átomos de hidrogênio e hélio encontram-se átomos de todos os outros elementos da tabela periódica. De modo confuso, os astrônomos denominam *metais* todos os elementos mais pesados que o hélio. Desse modo, eles nos dizem que, à medida que mais e mais estrelas grandes morriam, o universo ficava mais metálico. Da mesma forma, poderíamos dizer que o nosso Sol é mais metálico do que as gerações anteriores de estrelas, porque contém mais metais.

Os espectroscópios podem nos dizer quais elementos estão presentes nas nuvens galácticas e em que quantidade. Os espectroscópios também podem identificar moléculas, aglomerados de átomos unidos por forças eletromagnéticas. Eles podem dizer, por exemplo, se a nuvem contém moléculas de água ou gelo ou moléculas de silicatos, que consistem principalmente em silício e oxigênio e compõem a maioria das poeiras e rochas da Terra. Sabemos agora que existem muitas moléculas simples nas nuvens de poeira galáctica, e entre elas estão algumas, como os aminoácidos (os elementos fundamentais das proteínas), que são cruciais para a vida na Terra.

A química é a disciplina que estuda como as forças eletromagnéticas constroem moléculas e como os átomos se combinam e se recombina para formar a diversidade material caleidoscópica de nosso mundo.

## RENDEZ-VOUS QUÍMICO: COMO OS ÁTOMOS SE COMBINAM

Os átomos são minúsculos. Seria possível reunir 1 milhão de átomos de carbono no ponto no final desta frase. Mas não se pense neles como bolas sólidas de matéria. Eles consistem quase inteiramente em espaço vazio. Cada um tem um núcleo minúsculo no centro, composto de prótons (com cargas positivas) e nêutrons (que não têm carga) unidos pela potente força nuclear. O resto do átomo está quase vazio. Orbitando em torno dos núcleos a enormes distâncias encontram-se nuvens de elétrons, aproximadamente um para cada próton no núcleo. No início do século XX, Ernest Rutherford, um dos pioneiros da física nuclear moderna, descreveu o núcleo de um átomo como “a mosca da catedral”.

A escala que Rutherford sugere é quase correta. Mas ele escreveu antes da evolução da física quântica moderna, que mostrou que sua metáfora também é enganosa. Os elétrons são minúsculos, com cerca de  $1/1836$  da massa de um próton. A física quântica mostrou que nunca podemos determinar sua velocidade ou posição exata. Podemos dizer onde um elétron *provavelmente* está, mas nunca *exatamente* onde está, porque qualquer tentativa de localizá-lo exigirá o uso de energia (imagine jogar a luz de uma lanterna em cima dele), e os elétrons são tão leves que a energia usada para detectá-los alterará sua velocidade e trajetória. É por isso que os físicos quânticos localizam os elétrons em órbita numa espécie de “névoa de probabilidade” que se espessa a certas distâncias do núcleo e se dispersa em outras. A névoa de probabilidade permeia a maior parte da catedral atômica e pode se infiltrar para além de suas paredes externas.<sup>1</sup>

A química diz respeito aos encontros e às guerras dentro dessas névoas de probabilidade. E há muita coisa acontecendo. Ligações formam-se e rompem-se entre prótons e elétrons, antigos laços são terminados, iniciam-se novos relacionamentos e o resultado é o surgimento de formas inteiramente novas de matéria. O que conduz toda essa atividade é o simples fato de que os elétrons têm cargas negativas que se repelem mutuamente, mas os atraem para as cargas positivas de prótons, seja em seu átomo, seja em átomos vizinhos. Os químicos estudam esses flertes e rivalidades e as ligações e tensões que criam à medida que elétrons se aproximam de átomos vizinhos para formar moléculas que ligam vários átomos, às vezes milhões ou mesmo bilhões deles, em estruturas mais complexas do que a estrela mais complexa. Cada padrão molecular tem propriedades emergentes distintas, então as possibilidades da química parecem infinitas. No entanto, os namoros têm suas próprias regras operacionais (às vezes tão perversas quanto as regras de um namoro humano), e estas governam o modo como a força eletromagnética pode construir complexidade química.

Os elétrons são os principais atores. Como os amantes humanos, os elétrons são imprevisíveis, volúveis e sempre abertos a melhores ofertas. Eles zumbem em torno de prótons em órbitas distintas, cada um associado a um nível de energia diferente. Sempre que possível, dirigem-se para as órbitas mais próximas do núcleo de um átomo, o que requer menos energia. Mas o número de espaços em cada órbita é limitado, e se não há lugar sobrando nas órbitas internas eles terão de se contentar com lugares em uma órbita externa. Se essa órbita tiver o número correto de elétrons, todo mundo fica feliz. Essa é a situação dos chamados gases nobres, como o hélio ou o argônio, que se encontram do

lado direito da tabela periódica. Eles não combinam com outros átomos porque estão mais ou menos satisfeitos com o statu quo.

Mas, se as órbitas externas de um átomo não são preenchidas, isso cria embaraço, problemas e tensões, e as disputas intermináveis pela posição que isso causa podem explicar muita coisa da química. Alguns elétrons abandonam o barco e se dirigem para átomos vizinhos. Se fizerem isso, o átomo que deixaram terá perdido uma carga negativa, então ele pode se acasalar com um átomo que tem um elétron extra para formar uma ligação iônica. É assim que o sal se forma a partir de átomos de sódio, cujo elétron mais externo costuma estar disposto a pular, e de cloro, que frequentemente está em busca de um elétron extra para preencher sua órbita externa. Às vezes, os elétrons se sentirão mais confortáveis quando estiverem girando em torno de dois núcleos, de modo que os núcleos compartilhem efetivamente suas cargas numa ligação covalente. É assim que átomos de hidrogênio e oxigênio se combinam para formar moléculas de água. Mas a molécula que eles formam é desequilibrada, com dois pequenos átomos de hidrogênio em um dos lados de um átomo de oxigênio maior. Essa forma estranha distribui cargas negativas e positivas de maneira desigual sobre a superfície da molécula e confunde os átomos de hidrogênio, que muitas vezes são atraídos pelos átomos de oxigênio em moléculas vizinhas. Essa atração explica por que as moléculas de água podem se unir em gotas, explorando essas ligações de hidrogênio fracas. As ligações de hidrogênio desempenham um papel fundamental na química da vida porque são responsáveis por grande parte do comportamento de moléculas genéticas, como o DNA. Nos metais, os elétrons se comportam de maneira muito diferente. Uma vasta multidão de elétrons cruza entre os núcleos metálicos, e isso explica por

que os metais são tão bons na condução de correntes elétricas, que são, na verdade, enormes fluxos de elétrons.

O carbono, com seis prótons em seu núcleo, é o dom-juan desses romances atômicos. Ele normalmente tem quatro elétrons em sua órbita externa, mas há espaço suficiente para oito, então você pode deixar um átomo de carbono feliz se remover quatro elétrons de sua camada externa, se adicionar quatro elétrons, ou se permitir que ele compartilhe quatro elétrons com outro átomo. Isso dá muitas opções, e é por isso que o carbono pode formar moléculas complicadas com anéis, correntes e outras formas exóticas. Seu virtuosismo explica por que o carbono é tão importante para a química da vida.

As regras básicas da química parecem ser universais. Sabemos disso porque os espectroscópios mostram que muitas das moléculas simples que encontramos na Terra também existem nas nuvens de poeira interestelar. Mas a química interestelar parece ser bastante simples; nenhuma molécula interestelar detectada até agora tem mais de cem átomos, mais ou menos. E isso não é surpresa. Afinal, no espaço, os átomos estão distantes, por isso é difícil para eles se engancharem. Além disso, as temperaturas são gélidas, então há pouca energia de ativação, necessária para empurrar átomos a parcerias de longo prazo. O que é mais impressionante na química interestelar é que ela pode gerar não apenas as moléculas simples a partir das quais os planetas se formaram, como água e silicatos, mas também muitas das moléculas básicas da vida, como aminoácidos, os componentes das proteínas. Com efeito, sabemos agora que moléculas orgânicas simples são comuns no universo, e isso aumenta a probabilidade de que exista vida além do planeta Terra.

#### LIMIAR 4: DE MOLÉCULAS A LUAS, PLANETAS E SISTEMAS SOLARES

Moléculas químicas simples que orbitam estrelas jovens criaram as condições Cachingos Dourados para nosso próximo limiar de crescente complexidade, porque forneceram os pilares para objetos astronômicos inteiramente novos: planetas, luas e asteroides. Os corpos planetários eram quimicamente mais ricos do que as estrelas e muito mais frios, por isso ofereciam ambientes ideais para a química complexa. E em pelo menos um planeta (o nosso) e provavelmente em muitos outros, a química acabaria por gerar vida.

Durante muito tempo, soubemos da existência de somente um sistema solar. Mas, em 1995, os astrônomos identificaram *exoplanetas*, planetas girando em torno de outras estrelas de nossa galáxia. Fizeram isso detectando pequenas oscilações nos movimentos das estrelas ou pequenas variações em seu brilho quando os planetas cruzavam na frente delas. Desde então, aprendemos que a maioria das estrelas tem planetas e, portanto, pode haver dezenas de bilhões de sistemas planetários de muitos tipos diferentes apenas em nossa galáxia. Em meados de 2016, os astrônomos já haviam identificado mais de 3 mil exoplanetas. Nas duas próximas décadas, o estudo de outros sistemas planetários deve nos dar uma noção melhor das configurações mais comuns. Em breve, poderemos estudar suas atmosferas, o que pode nos dar uma ideia de quantos podem ser propícios à vida. Já sabemos que muitos são aproximadamente do mesmo tamanho da Terra, e muitos orbitam à distância certa de suas estrelas para ter água líquida — um ingrediente fundamental para a vida.

A descoberta de exoplanetas nos diz que, tal como o limiar 3, o limiar 4 foi cruzado muitas vezes, e pode ter sido cruzado pela primeira vez bem cedo na história do universo em torno de uma estrela que provavelmente jamais iremos detectar. Mas sabemos agora bastante sobre como é a passagem desse limiar.

A formação de sistemas planetários é um processo confuso e caótico, um subproduto da formação de estrelas em regiões do espaço quimicamente enriquecidas. Bilhões de anos após o big bang, o espaço interestelar estava cheio de nuvens de matéria contendo muitos elementos químicos diferentes. Hidrogênio e hélio ainda representavam quase 98% dessas nuvens, mas foram os 2% restantes que fizeram a diferença. Como no universo primitivo, a gravidade gostava de tornar essas nuvens mais grumosas. Em nossa região, a gravidade pode ter sido ajudada por uma explosão de supernova nas proximidades que abalou as coisas e começou a contração de uma enorme nuvem de gás e poeira em torno de 4,567 bilhões de anos atrás. A supernova deixou seu cartão de visita em determinados materiais radioativos que aparecem em meteoritos dentro do nosso sistema solar.

Ao se contrair, a nuvem de poeira se fragmentou em múltiplas nebulosas solares, uma das quais formou nosso astro rei. O Sol engoliu 99,9% de toda a matéria em sua nuvem de poeira. Mas o que nos interessa agora são as sobras, os anéis de detritos orbitando o jovem Sol. À medida que a gravidade encolhia a nebulosa solar, sua massa rodopiante de partículas de gás, poeira e gelo girou cada vez mais rápido até que as forças centrífugas a aplainaram como uma massa de pizza para criar o plano fino do sistema solar de hoje. Podemos agora observar esses discos protoplanetários em regiões próximas de formação de estrelas, por isso sabemos que eles são muito comuns.

Dois processos transformaram o disco giratório de matéria em planetas, luas e asteroides. O primeiro foi um tipo de separação química. Irrupções violentas de partículas carregadas do jovem Sol, conhecidas como vento solar, explodiram elementos mais leves, como hidrogênio e hélio, para longe das órbitas internas e criaram duas regiões distintas. As regiões externas do jovem sistema solar, como a maior parte do universo, consistiam principalmente nos elementos primordiais, hidrogênio e hélio. Mas as regiões internas, onde se formariam os planetas rochosos — Mercúrio, Vênus, Terra e Marte —, perderam tanto hidrogênio e hélio que tinham uma rara diversidade química. Oxigênio, silício, alumínio e ferro compõem mais de 80% da crosta terrestre, e elementos como cálcio, carbono e fósforo desempenham papéis menores. Na Terra, o hidrogênio desempenha apenas um papel de tamanho médio, e o hélio quase nunca é avistado.

O segundo processo que formou nosso sistema solar foi a *acrecção*. Dentro de órbitas diferentes ao redor do jovem Sol, pedaços de matéria lentamente se juntaram. Nas regiões mais afastadas e mais gasosas, ocorreu um processo provavelmente bastante delicado. A gravidade coletava matéria em enormes planetas gasosos, como Júpiter e Saturno, que consistiam principalmente em hidrogênio e hélio com uma fina camada de poeira e gelo. Nas regiões internas, porém, a acreção foi um processo mais violento e caótico, porque ali havia muito mais matéria sólida. Partículas de poeira e gelo se juntaram para formar pequenas bolhas de rocha e gelo, que se moviam de forma caótica, às vezes despedaçando-se umas às outras, às vezes se unindo para formar objetos maiores. Por fim, objetos ainda maiores apareceram, como meteoros e asteroides, e, dentro de cada órbita, eles colidiram uns com os outros, ou se fundiram para formar objetos tão grandes que sua gravidade poderia

varrer a maior parte dos detritos remanescentes. Nesses processos, acabaram por gerar os planetas que vemos hoje, espaçados em órbitas distintas ao redor do Sol.

Este relato dá pouca ideia do caos e da violência da acreção. Alguns objetos cruzaram órbitas, derrubando planetas e luas jovens ou despedaçando-os. O vasto protoplaneta de Júpiter pode ter migrado para dentro e sua atração gravitacional destruiu qualquer planeta que estivesse se formando no que é agora o cinturão de asteroides. A estranha inclinação e a rotação de Urano são provavelmente consequência de uma violenta colisão com outro corpo grande. E as formas irregulares de muitos asteroides são as cicatrizes de colisões brutais no início da história de nosso sistema solar.

As colisões continuaram durante muito tempo, mesmo depois que o sistema solar se estabilizou. Com efeito, nossa própria lua foi provavelmente formada por uma colisão entre a Terra jovem e um protoplaneta do tamanho de Marte (Theia) cerca de 100 milhões de anos após o nascimento do sistema solar. Essa colisão enviou enormes nuvens de matéria para a órbita da Terra, onde provavelmente circularam como os anéis de Saturno (que também podem ser os escombros de uma lua destruída) até se juntarem para formar a Lua.

Dentro de 50 milhões de anos, nosso sistema solar adquiriu a forma básica que tem hoje, e desde então se mostrou bastante estável. Os bilhões de sistemas planetários em nosso universo se formaram provavelmente de maneira semelhante, embora existam numa grande variedade de diferentes configurações. Mas todos os corpos planetários são mais frios que as estrelas e quimicamente mais ricos e diversificados, e é por isso que eles forneceram as condições Cachingos Dourados que permitiram a construção de novas formas de complexidade. Por fim,

pelo menos um desses objetos, e provavelmente muitos mais, gerou a vida.

## O PLANETA TERRA

Nosso sistema solar está na galáxia que chamamos de Via Láctea, em um subúrbio estelar de um dos braços espiralados da Via Láctea, o esporão de Órion. A Via Láctea faz parte de um grupo de cerca de cinquenta galáxias, conhecido, sem romantismo, como Grupo Local. Esse grupo situa-se nas regiões externas do Aglomerado de Virgem, que tem cerca de mil galáxias. Isso faz parte do Superaglomerado Local, que inclui centenas de grupos de galáxias. Seriam necessários 100 milhões de anos viajando à velocidade da luz para atravessá-lo. Em 2014, descobriu-se que o Superaglomerado Local faz parte de um vasto império cósmico com talvez 100 mil galáxias, e atravessá-lo levaria 400 milhões de anos viajando à velocidade da luz. Esse império é o Superaglomerado Laniakea (“céu imensurável” em língua havaiana). Trata-se da maior entidade estruturada que conhecemos atualmente no universo. Supomos que o Laniakea esteja construído em torno de um andaime de matéria escura cuja atração gravitacional mantém todas essas galáxias juntas à medida que o universo se expande.

Agora devemos viajar de volta para os subúrbios de Laniakea, para o nosso próprio grupo local, nossa própria galáxia, e para o esporão de Órion, onde encontramos nosso Sol e o planeta Terra. Depois que a Terra se formou por acreção, uma exibição final da escultura de motosserra deu-lhe sua estrutura interna peculiar. Os geólogos chamam esse processo de *diferenciação*.

A jovem Terra se aqueceu e derreteu. Ela foi aquecida pelas violentas colisões da acreção, pela presença de elementos radioativos (criados na supernova que forneceu grande parte do material para o nosso sistema

solar) e pela crescente pressão à medida que aumentava de tamanho. Por fim, a jovem Terra estava tão quente que grande parte dela se transformou numa lama pegajosa e, ao se liquefazer, suas diferentes camadas se separaram pela densidade, dando-lhe a estrutura que tem hoje.

Os elementos mais pesados, principalmente ferro e níquel e um pouco de silício, afundaram no lodo quente até o centro para formar o núcleo metálico da Terra. À medida que a Terra girava, o núcleo gerava um campo magnético que protegia a superfície das partículas prejudiciais carregadas do vento solar. Rochas mais leves, como basaltos, se reuniram acima do núcleo para formar uma segunda camada, uma região de rocha semiderretida de 3 mil quilômetros de profundidade, misturada com gás e água, conhecida como manto. É de onde vem a lava expelida pelos vulcões. As rochas mais leves, muitas delas graníticas, flutuaram para a superfície, onde esfriaram e se solidificaram para formar uma terceira camada: o estrato fino como casca de ovo conhecido como crosta, que hoje está coberta por oceanos e continentes. Sob os oceanos, a crosta às vezes tem apenas cinco quilômetros de espessura, mas sob os continentes pode ter até cinquenta quilômetros. A crosta é particularmente interessante do ponto de vista químico. Nela, é possível encontrar sólidos, líquidos e gases, e foi repetidamente aquecida e resfriada por vulcões, impactos de asteroides, pelo brilho inclemente do jovem Sol e pela eventual condensação dos primeiros oceanos da Terra. Nessa camada e no manto, o calor e a circulação de elementos geraram talvez 250 minerais novos.<sup>2</sup> Os gases, entre eles dióxido de carbono e vapor de água, borbulhavam do manto através de vulcões e rachaduras na superfície para formar uma quarta camada: a primeira atmosfera da Terra. A crosta e a atmosfera também foram enriquecidas por gases,

água, moléculas complexas e outros materiais trazidos pelos asteroides e cometas.

O núcleo quente e fundido manteve a jovem Terra dinâmica, enquanto a energia do centro abria caminho através do planeta, esquentando e agitando suas camadas superiores para criar correntes de rocha suave no manto e uma superfície pontilhada de vulcões. O calor do núcleo ainda provoca mudanças nos níveis superiores do planeta Terra. Hoje, podemos rastrear o movimento da superfície usando sistemas GPS, e sabemos que as placas litosféricas da superfície se movem aproximadamente à velocidade em que as unhas crescem; as mais rápidas viajam a cerca de 25 centímetros por ano.

Os geólogos organizam a história da Terra em subdivisões, a maior das quais é o éon. O primeiro é o éon hadeano (“infernai”). Ele durou desde quando a Terra se formou até cerca de 4 bilhões de anos atrás, quando o éon arqueano começou. Se a tivéssemos visitado durante o éon hadeano, teríamos encontrado um planeta ainda afetado pela competição destruidora da acreção. Marcas e rasgos na superfície da Lua e outros planetas mostram que, entre 4 bilhões e 3,8 bilhões de anos atrás, o sistema solar interno foi submetido a um massivo ataque de asteroides e outros objetos extraviados, conhecido como o Bombardeio Pesado Tardio, causado provavelmente por mudanças nas órbitas de Júpiter e Saturno, que pulverizaram objetos aleatoriamente pelo jovem sistema solar. Hoje, a maioria dos asteroides vive entre Júpiter e Marte e talvez sejam os tijolos e suportes de um planeta que nunca foi construído por causa do puxão gravitacional de Júpiter. Atualmente, sabemos da existência de cerca de 300 mil asteroides. Embora a maioria seja pequena, é muita matéria extraviada para bombardear os planetas internos.<sup>3</sup>

## ESTUDANDO A TERRA: SISMÓGRAFOS E DATAÇÃO RADIOMÉTRICA

Apesar do que Hollywood pode nos fazer acreditar, não podemos cavar um buraco muito fundo na Terra. A escavação mais profunda até agora foi de cerca de doze quilômetros, o que representa em torno de 0,2% da distância até o centro da Terra. Esse buraco foi perfurado na península de Kola, no extremo noroeste da Rússia, durante uma investigação geológica. Sabemos a respeito do interior graças a outro truque científico, o equivalente geológico de um raio X. Os terremotos geram tremores que viajam pelo interior da Terra. Os sismógrafos medem esses tremores em diferentes locais da superfície. Ao comparar os resultados de diferentes regiões, é possível descobrir a rapidez e a distância que os tremores viajaram através do interior do planeta. Sabemos também que diferentes tipos de tremores viajam a diferentes velocidades através de diferentes materiais, e alguns viajam apenas através de sólidos, enquanto outros podem viajar também através de líquidos. Desse modo, rastrear esses tremores com múltiplos sismógrafos pode nos contar muito sobre o interior da Terra.

Determinar a idade da Terra e as muitas outras datas espalhadas pela história moderna das origens tornou-se possível somente na segunda metade do século XX, e isso dependeu de uma ciência muito esperta.

Os primeiros passos em direção a uma história moderna do planeta Terra foram dados no século XVII. Foi quando alguns dos pioneiros da geologia moderna perceberam que seria possível determinar a *ordem* dos eventos na história da Terra, mesmo que ninguém tivesse ideia de exatamente *quando* as coisas aconteceram. No século XVII, Nicholas Steno, um padre dinamarquês que vivia na Itália, mostrou que o estudo

meticuloso das rochas sedimentares tornava possível determinar a ordem na qual diferentes estratos de rocha haviam sido depositados. Todas as rochas sedimentares são construídas camada por camada, por isso sabemos que as camadas mais antigas são normalmente as mais baixas. Qualquer coisa que as atravessasse deveria ser mais jovem.

No início do século XIX, o topógrafo inglês William Smith mostrou que sequências idênticas de fósseis apareciam em formações rochosas em lugares diferentes. Na suposição razoável de que fósseis semelhantes devem ter vindo da mesma época, seria possível identificar estratos ao redor do mundo que se acumularam ao mesmo tempo. Juntos, esses princípios permitiram que os geólogos do século XIX criassem uma linha do tempo relativa para a história da Terra. Essa linha do tempo ainda está por trás dos modernos sistemas geológicos de datação e começa com o Cambriano, o primeiro período cujos estratos continham fósseis visíveis a olho nu.

Mas ninguém sabia *quando* ocorrera o período cambriano, e muitos geólogos perderam a esperança de encontrar datas absolutas para diferentes camadas. Em 1788, James Hutton escreveu: “Não encontramos vestígios de um começo, nenhuma perspectiva de um fim”.<sup>4</sup> Ainda no início do século XX, a única maneira de datar um evento era encontrar um registro escrito que o mencionasse. E isso significava, como H. G. Wells destacou quando tentou escrever uma história moderna das origens logo após a Primeira Guerra Mundial, que linhas do tempo absolutas não podiam ir mais longe no passado do que alguns milhares de anos.

Embora H. G. Wells não soubesse, algumas das descobertas que acabariam por proporcionar datas melhores já haviam sido feitas. A chave era a radioatividade, uma forma de energia descoberta por Henri

Becquerel em 1896. Em átomos com núcleos grandes, como o urânio, o poder repulsivo de muitos prótons positivamente carregados pode desestabilizar o núcleo até que ele se rompe espontaneamente, emitindo elétrons de alta energia ou fótons, ou até mesmo núcleos inteiros de hélio. Quando pedaços do núcleo são ejetados, o elemento é transformado em diferentes elementos com menos prótons. Por exemplo, o urânio acaba por se decompor em chumbo. Na primeira década do século XX, Ernest Rutherford percebeu que, mesmo que não se soubesse dizer quando determinado núcleo estava prestes a se romper, a decomposição radioativa era um processo muito regular quando se calculava a média de bilhões de partículas. Todos os isótopos do mesmo elemento (os isótopos têm o mesmo número de prótons, mas números diferentes de nêutrons) se decompõem em ritmos diferentes, mas regulares, então é possível determinar com precisão quanto tempo levará para que metade dos átomos de um determinado isótopo decaia. Por exemplo, a meia-vida do urânio-238 (com 92 prótons e 146 nêutrons) é de 4,5 bilhões de anos, enquanto o urânio-235 (com 92 prótons e 143 nêutrons) tem uma meia-vida de 700 milhões de anos.

Rutherford percebeu que a decomposição radioativa poderia fornecer uma espécie de relógio geológico se fosse possível medir quanto uma determinada amostra havia decaído. Em 1904, ele tentou medir a decomposição de uma amostra de urânio e chegou a um número de cerca de 500 milhões de anos para a idade da Terra. A ideia básica estava certa, mas sua estimativa da idade da Terra era controversa porque era muito mais antiga do que a idade aceita de menos de 100 milhões de anos.

Com o tempo, um número crescente de geólogos começou a concordar que a Terra poderia ser muito mais antiga do que eles

pensavam. Mas os problemas técnicos de medir a decomposição radioativa eram imensos. Eles foram resolvidos apenas no final da década de 1940, usando métodos desenvolvidos como parte do Projeto Manhattan, que havia fabricado a primeira bomba atômica. Para fabricar a bomba, foi necessário separar diferentes isótopos de urânio para produzir amostras purificadas de urânio-235. O físico americano Willard Libby ajudou a desenvolver as técnicas para separar e medir diferentes isótopos de urânio, e estes seriam cruciais na tarefa de medir a decomposição radioativa.

Em 1948, a equipe de Libby conseguiu dar datas precisas para o material do túmulo do faraó Zoser, que fora posto à disposição pelo Metropolitan Museum.<sup>5</sup> Eles usaram carbono-14, um isótopo radioativo de carbono que tem meia-vida de 5730 anos, o que o torna extremamente útil no estudo de materiais orgânicos, como madeira. Diferentes materiais radioativos trabalhavam em diferentes escalas e com diferentes materiais. Para os geólogos, o decaimento do urânio para chumbo era particularmente valioso, e o fato de diferentes isótopos de urânio se decomporem a diferentes taxas permitia uma verificação cruzada.<sup>6</sup> Em 1953, Clair Patterson datou a idade de um meteorito de ferro usando a decomposição do urânio para chumbo. Ele fez a suposição correta de que os meteoritos eram compostos de material primordial do sistema solar jovem e, portanto, poderiam fornecer uma idade para todo o sistema solar. Suas medições sugeriam que a Terra tinha cerca de 4,5 bilhões de anos, ou seja, era muito mais velha do que a idade estimada por Rutherford. A data de Patterson ainda está de pé hoje.

Juntamente com as técnicas de datação radiométrica, surgiram outras técnicas de datação que podem ser usadas para fazer verificações

cruzadas. As datas dentro de milênios recentes podem ser determinadas contando-se os anéis de crescimento de árvores antigas, como o *Pinus aristata*, uma espécie de pinheiro norte-americano que pode viver por vários milhares de anos. Os astrônomos usam suas próprias técnicas para datar a história do universo, e os biólogos descobriram que o DNA evolui num ritmo razoavelmente regular, de modo que se pode datar aproximadamente quando duas espécies divergiram de um ancestral comum medindo diferenças em seus genomas. Essas técnicas, baseadas no estudo cuidadoso de processos como a decomposição radioativa, bem como o desenvolvimento de novos instrumentos para medi-los com precisão, nos deram as linhas do tempo em torno das quais a história moderna das origens é construída.

Até agora, vimos a complexidade aumentar em entidades interessantes, mas não vivas. Agora chegamos a um dos mais fundamentais de todos os nossos limiares: o aparecimento da vida. Com a vida, encontramos um tipo e um nível de complexidade inteiramente novos e toda uma série de novos conceitos, incluindo informação, propósito e até mesmo, em determinado momento, consciência.

PARTE II  
BIOSFERA

## 4. Vida: limiar 5

*Passei a tarde refletindo sobre a vida. Pensando bem, que coisa esquisita é a vida! Tão diferente de qualquer outra coisa, não é, se você me entende.*

P. G. Wodehouse, *Meu homem Jeeves*

*O que está no coração de todo ser vivo não é um fogo, nem um sopro quente, tampouco uma “centelha de vida”. São informações, palavras, instruções. [...] Se você quer entender a vida, não pense em gelatinas e lodos vibrantes e latejantes, pense em tecnologia da informação.*

Richard Dawkins, *O relojoeiro cego*

## VIDA E INFORMAÇÃO: UM NOVO TIPO DE COMPLEXIDADE

A vida tal como a conhecemos surgiu da química exótica nos ambientes ricos em elementos do jovem planeta Terra, há quase 4 bilhões de anos. Se a vida existe em outro lugar, talvez pareça tão estranha que não a reconheceríamos. Mas, no planeta Terra, a vida é construída a partir de bilhões de nanomáquinas moleculares intrincadas. Elas trabalham juntas dentro de estruturas protetoras semelhantes a bolhas que consideramos os pilares da vida — as unidades estruturais, funcionais e biológicas básicas de todos os organismos vivos conhecidos. Essas bolhas protegidas chamam-se células, do latim *cella*, que significa “quarto pequeno”. As células são as menores unidades de vida capazes de se replicar de forma independente. Elas sobrevivem extraindo fluxos delicados de nutrientes e de energia livre de seu entorno.

A vida causou um impacto colossal em nosso planeta porque os organismos vivos fazem cópias de si mesmos que podem se multiplicar, se espalhar, proliferar e diversificar. Ao longo de 4 bilhões de anos, um exército colossal de organismos vivos transformou a Terra e criou a biosfera: uma fina camada na superfície do planeta, composta de organismos vivos e por tudo que foi moldado, alterado ou deixado para trás pelos organismos vivos.

O mais esquisito da vida é que, embora o interior de cada célula pareça um pandemônio — uma espécie de luta livre na lama envolvendo 1 milhão de moléculas —, células inteiras dão a impressão de agir com um propósito. Algo dentro de cada célula parece dirigi-la, como se estivesse repassando uma lista de tarefas. Essa lista é simples: 1) permanecer viva apesar da entropia e do ambiente imprevisível; e 2)

fazer cópias de si que possam realizar a mesma coisa. E assim por diante, de célula a célula e de geração para geração. Nisso, na busca de alguns resultados e na evitação de outros, estão as origens do desejo, do cuidado, da intenção, da ética e até do amor. Talvez até mesmo o começo da significação, se isso significa a capacidade de discriminar entre o sentido de diferentes eventos e sinais. O que significa esse grande tubarão-branco nadando atrás de mim?

A aparência (ou, talvez, ilusão) de intencionalidade é nova. *Não* é uma característica das outras entidades complexas que vimos até agora. Significaria alguma coisa dizer que as estrelas têm um propósito? Ou os planetas e rochas? Ou até o universo? Não mesmo, pelo menos dentro das convenções da história moderna das origens. Mas as coisas vivas são diferentes. Elas não aceitam as regras da entropia passivamente; em vez disso, como crianças teimosas, reagem e tentam negociar. Elas não se satisfazem em trancar estruturas no lugar, como prótons ou elétrons. Elas não vivem de estoques de energia, como estrelas, que devoram uma despensa de prótons que foi bem abastecida no momento do nascimento e depois se desmantelam quando a despensa fica vazia. Os organismos vivos procuram constantemente novos fluxos de energia de seus ambientes, a fim de se manterem num estado que é complexo, mas instável. Este não é o comportamento das rochas, mas o de um pássaro em voo. Os organismos vivos ficam no ar (termodinamicamente falando), absorvendo energia livre para conduzir a química elaborada que reorganiza átomos e moléculas nos padrões necessários para mantê-los vivos. Quando não podem mais pagar os impostos de energia da entropia, eles caem.

Energia e vida! Na Austrália, lembro-me de observar meus filhos transformarem a energia dos sanduíches na energia violenta do

movimento enquanto gritavam ao redor do jardim. Podemos até medir a velocidade em que a energia livre (talvez de um sanduíche) flui à medida que é transformada em energia falante, energia de corrida e, por fim, energia térmica, com a entropia aumentando a cada passo. O ser humano médio consome cerca de 2,5 mil calorias por dia, cerca de 10,5 milhões de joules (uma medida de trabalho ou energia; uma caloria representa em torno de 4184 joules). Divida-se isso pelos 86,4 mil segundos de um dia e um indivíduo mobiliza cerca de 120 joules por segundo. Esta é a “potência nominal” de um ser humano: 120 watts, apenas ligeiramente maior que a potência de muitas lâmpadas tradicionais.<sup>1</sup>

A vida, com suas tentativas intermináveis de combater a entropia, representa um novo tipo e nível de complexidade. Os teóricos da complexidade às vezes descrevem entidades nesse nível como sistemas adaptativos complexos. Ao contrário dos sistemas físicos complexos que vimos até agora, cujos componentes se comportam de maneiras que normalmente podem ser previstas a partir das regras operacionais básicas do universo, os componentes de sistemas adaptativos complexos parecem ter vontade própria. Eles parecem seguir regras adicionais que são mais difíceis de detectar. Com efeito, sistemas adaptativos complexos, como bactérias, cães ou empresas multinacionais, agem como se cada componente fosse um agente com vontade própria, de modo que cada componente está constantemente se ajustando ao comportamento de muitos outros componentes. E isso produz comportamentos extremamente complexos e imprevisíveis.<sup>2</sup>

Ao usar a palavra “agente”, introduzi uma nova ideia que se tornará cada vez mais importante: a ideia de informação. Se os agentes reagem a outros agentes, eles estão reagindo a informações sobre o que está

acontecendo ao seu redor, inclusive informações sobre o que outros agentes estão fazendo. Se imaginarmos a informação como uma personagem em nossa história moderna das origens, devemos pensar nela como alguém que trabalha clandestina ou disfarçada, manipulando os acontecimentos, mas que permanece fora dos holofotes. A energia *causa* mudanças, de modo que é normalmente possível vê-la em ação, mas a informação *direciona* a mudança, muitas vezes agindo nas sombras. Como diz Seth Lloyd: “Fazer qualquer coisa requer energia. Especificar o que é feito requer informação”.<sup>3</sup>

Em sua forma mais geral, a informação consiste em regras que afetam os resultados por meio da limitação das possibilidades. Uma das definições mais famosas de informação é “uma diferença que faz a diferença”.<sup>4</sup> As regras determinam, a partir de todas as opções concebíveis, quais mudanças são realmente possíveis em um determinado momento e lugar, e isso faz uma diferença. A informação começa com as leis da física, o sistema operacional básico do nosso universo. As leis da física dirigem a mudança para caminhos específicos, como aqueles pelos quais a gravidade criou as primeiras estrelas. Nesse sentido muito geral, a informação limita o que é possível, por isso reduz a aleatoriedade. Esse é o motivo pelo qual mais informação parece significar menos entropia, menos potencial para a desordem que a entropia adora. Isso é informação universal: as regras embutidas em cada pedacinho de matéria e energia. Ninguém precisou dizer à gravidade o que fazer: ela simplesmente continuou com o trabalho.

No uso coloquial, no entanto, o termo *informação* significa mais que regras. Significa regras que *são lidas* por alguma pessoa, agente ou coisa — na verdade, por algum sistema adaptativo complexo. Esse tipo de informação surge porque muitas regras importantes *não* são universais.

Como as leis das sociedades humanas, elas mudam de lugar para lugar e de momento para momento. À medida que o universo evoluiu, apareceram novos ambientes, como o espaço profundo, as nuvens de poeira galáctica e as superfícies dos planetas rochosos. Esses ambientes tinham suas próprias regras locais que *não* eram universais. As regras locais devem ser lidas, decodificadas ou estudadas, assim como antes de visitar a Mongólia queremos saber de que lado da estrada os mongóis dirigem seus carros (o lado direito, a propósito).

Sistemas adaptativos complexos podem sobreviver somente em ambientes muito específicos, por isso precisam ser capazes de ler ou decodificar informações locais, bem como as regras universais. E isso é novo. Todas as formas de vida requerem mecanismos para interpretar a informação local (como a presença de diferentes substâncias químicas ou temperaturas locais e níveis de acidez) para que possam reagir de modo apropriado (“Devo abraçá-la, comê-la ou fugir?”). O filósofo Daniel Dennett escreve: “Os animais não são apenas herbívoros ou carnívoros. São... *informívoros*”.<sup>5</sup> Com efeito, todos os organismos vivos são informívoros. Todos eles consomem informações, e os mecanismos que usam para ler e reagir a informações locais — sejam olhos e tentáculos, sejam músculos e cérebros — são responsáveis por grande parte da complexidade dos organismos vivos.

Os ambientes locais são instáveis, de modo que os organismos vivos devem monitorar constantemente seus ambientes internos e externos para detectar mudanças significativas. E, à medida que aumenta a complexidade dos organismos, eles precisam de mais e mais informações, porque estruturas mais complexas têm mais partes móveis e mais ligações entre suas partes. A bactéria *E. coli*, que provavelmente está florescendo em seu intestino enquanto você lê este livro, destina

cerca de 5% de seus recursos moleculares ao movimento e à percepção, mas no corpo humano a *maioria* dos órgãos dedica-se, direta ou indiretamente, à percepção ou ao movimento, do cérebro aos olhos, aos tecidos nervosos e aos músculos.<sup>6</sup> A ciência moderna está na extremidade de um vasto espectro de sistemas de coleta e análise de informações que começam com os simples sensores dos primeiros organismos unicelulares.

A entropia, é claro, está de olho em tudo isso. Se mais complexidade significa mais informação, quando se aumentam a complexidade e a informação, *reduzem-se* a entropia e a incerteza ou desordem que a acompanha. E a entropia notará. E esfregará as mãos ao pensar nos impostos e taxas de energia que pode cobrar à medida que a complexidade e a informação aumentam.<sup>7</sup> Com efeito, há quem argumente que a entropia realmente gosta da ideia da vida (e pode encorajá-la a aparecer em muitas partes do universo), porque a vida degrada a energia livre de maneira muito mais eficiente do que a não vida.

Explicar as origens da vida na Terra e tentar descobrir se algo semelhante poderia ter surgido em outras partes do nosso universo está entre os problemas mais difíceis enfrentados pela ciência moderna. No momento, conhecemos apenas um planeta com vida. Os astrobiólogos procuram por vida em outro lugar através do programa de Busca por Inteligência Extraterrestre (SETI), que começou em 1960, mas até agora não encontraram nada. Por enquanto, estamos confinados a estudar as origens da vida na Terra. Até isso é extraordinariamente difícil, pois significa tentar determinar o que acontecia em nosso planeta há quase 4 bilhões de anos, quando a Terra era muito diferente.

## DEFININDO VIDA

O fato de termos apenas uma única amostra dificulta até mesmo saber o que *é* a vida. O que distingue a vida da não vida? A vida é tão difícil de definir quanto a complexidade ou a informação, e parece haver uma zona de fronteira turva entre a vida e a não vida.

A maioria das definições modernas da vida na Terra incluiria as seguintes cinco características:

1. Os organismos vivos consistem em células cercadas por membranas semipermeáveis.
2. Eles têm um metabolismo, mecanismos que exploram e utilizam fluxos de energia livre de seus arredores para que possam reorganizar átomos e moléculas nas estruturas complexas e dinâmicas de que precisam para sobreviver.
3. Eles podem ajustar-se a ambientes em mudança por homeostase, usando informações sobre seus ambientes internos e externos e mecanismos que lhes possibilitam reagir.
4. Eles podem reproduzir-se usando informações genéticas para fazer cópias quase exatas de si mesmos.
5. Mas as cópias diferem em detalhes minúsculos dos pais, e assim, ao longo de muitas gerações, as características dos organismos vivos mudam lentamente à medida que evoluem e se adaptam a ambientes em mudança.

Examinemos essas características, uma de cada vez.

Todas as coisas vivas na Terra consistem em células. Cada célula contém milhões de moléculas complexas que reagem umas com as outras, muitas vezes a cada segundo, à medida que avançam através de um lodo químico aquoso e salgado, cheio de proteínas no reino grudento conhecido como citoplasma. O citoplasma é delimitado por uma espécie de cerca química, a membrana celular, que controla o que entra e o que

sai. Tal como as muralhas de uma cidade medieval, a membrana tem portões e guardas que decidem quais viajantes moleculares podem entrar e quando. Células são realmente parecidas com cidades. Em um livro sobre células, Peter Hoffmann escreve:

Há uma biblioteca (o núcleo, que contém o material genético), usinas de energia (mitocôndrias), rodovias (microtúbulos e filamentos de actina), caminhões (cinesinas e dineínas), descartes de lixo (lisossomos), muralhas (membranas), agências de correios (complexo de Golgi) e muitas outras estruturas que cumprem funções vitais. Todas essas funções são realizadas por máquinas moleculares.<sup>8</sup>

Todos os organismos vivos dependem de fluxos de energia livre cuidadosamente administrados. Se o fluxo parar, eles morrem, como uma cidade sitiada obrigada pela fome a se render. Mas, se o fluxo for violento demais, eles também morrerão, como uma cidade sob bombardeio aéreo. Portanto, os fluxos de energia precisam ser administrados com grande delicadeza. Normalmente, as células absorvem e usam energia em doses minúsculas, elétron por elétron ou próton por próton. Embora pequenos o suficiente para não serem disruptivos, esses fluxos são suficientemente grandes para fornecer as energias de ativação necessárias para conduzir muita química interessante. Etimologicamente, a palavra “metabolismo” vem do grego e significa “mudança”. É um lembrete de que as células nunca ficam paradas. Como pássaros em voo, elas usam fluxos de energia para continuar se ajustando a ambientes em constante mudança.

Os organismos vivos precisam monitorar e ajustar-se constantemente às mudanças em seus ambientes. Esse ajuste constante é conhecido como preservação da homeostase. Para manterem algum tipo de equilíbrio na mudança de ambiente, as células devem acessar, baixar e decodificar continuamente informações sobre seus ambientes internos e externos,

decidir sobre a melhor reação e depois reagir. A palavra “homeostase” também vem do grego e significa “parado”, que é o oposto de “mudança”. Mas faz sentido ficar parado no interminável furacão molecular do ambiente celular.

Por mais impressionantes que sejam essas habilidades, elas seriam de pouco interesse se os organismos vivos aparecessem e desaparecessem como espuma numa onda do oceano. E isso pode ter acontecido em alguns planetas que giram em torno de algumas estrelas e talvez até no início da história da Terra. Mas hoje, no planeta Terra, os organismos vivos não se satisfazem somente em se opor ao furacão da mudança e da entropia. Eles também fazem cópias de si mesmos, de modo que, quando determinadas células caem (e eventualmente todas cairão), outras podem tomar o lugar delas. A reprodução é a capacidade de fazer cópias viáveis de células. Reprodução significa que o *modelo* para a criação de um organismo (seu *genoma*, na terminologia moderna) pode sobreviver mesmo após a morte de indivíduos. Como um manual de instruções, o genoma armazena informações sobre as proteínas necessárias para construir uma cópia do pai, bem como algumas regras básicas de montagem. Hoje, a maioria dessas informações é armazenada em moléculas de DNA. Mas no início da história da vida na Terra elas estavam provavelmente armazenadas no RNA, um primo molecular do DNA que ainda faz muito do trabalho pesado dentro das células.

Embora os modelos sejam mais ou menos imortais, o processo de cópia não é perfeito. Trata-se de uma boa notícia, pois significa que os modelos podem mudar lentamente em consequência de pequenos erros de cópia, e essa é a chave para a adaptação e a evolução. Pequenas mudanças genéticas dão à vida sua notável resiliência porque permitem que as espécies se adaptem a seus ambientes criando de forma aleatória

modelos ligeiramente diferentes. À medida que os ambientes mudam, o mesmo acontece com as regras que determinam quais modelos sobreviverão e quais vão perecer.

Esse é o mecanismo que Charles Darwin descreveu como *seleção natural*. Trata-se de uma ideia fundamental na biologia moderna, porque é um impulsionador extraordinariamente poderoso da complexidade crescente. A seleção natural filtra algumas possibilidades genéticas, permitindo apenas aquelas compatíveis com as regras locais. Assim, a seleção natural é uma chave catraca, como as leis fundamentais da física, porque ela trava padrões não aleatórios no lugar. Mas no âmbito biológico, são as regras locais dos ambientes, não as regras universais da física, que determinam o que sobrevive. E as regras biológicas são muito mais detalhistas. Não espere que uma girafa sobreviva debaixo da água.

Tal como os mecanismos que geraram as primeiras estruturas do universo, a seleção natural liga a necessidade e o acaso. A variação fornece múltiplas possibilidades; a seleção natural usa regras locais para escolher aquelas que funcionarão sob condições locais. Nas palavras do próprio Darwin em *A origem das espécies*:

Pode-se [...] pensar que é improvável [que] variações úteis de algum modo a cada ser na grande e complexa batalha da vida devam às vezes ocorrer no curso de milhares de gerações? Se isso ocorrer, podemos duvidar (lembrando que muito mais indivíduos nascem do que podem sobreviver) que os indivíduos que têm alguma vantagem, por menor que seja, sobre os outros teriam a melhor chance de sobreviver e de procriar sua espécie? Por outro lado, podemos ter certeza de que qualquer variação danosa mínima seria rigidamente destruída. A essa preservação de variações favoráveis e rejeição de variações prejudiciais, chamo de Seleção Natural.<sup>9</sup>

A ideia de Darwin, quando ligada a um entendimento moderno da genética e da hereditariedade, explica a criatividade da vida, sua

capacidade ao longo de muitas gerações de explorar possibilidades, aproveitar novos fluxos de energia e construir novos tipos de estruturas. Ela explica como, no âmbito biológico, estruturas de complexidade impressionante podem surgir através de processos algorítmicos repetitivos à medida que são filtradas de inúmeras variações, passo a passo e geração a geração, ao longo de milhões e bilhões de anos.

A ideia da seleção natural chocou os contemporâneos de Darwin porque parecia acabar com a necessidade de um deus criador.<sup>10</sup> E isso era fundamental para a história cristã das origens que a maioria das pessoas aceitava na Inglaterra vitoriana. Até mesmo Darwin estava preocupado, e sua esposa, Emma, temia que ela e Charles acabassem em lugares diferentes na vida após a morte. Mas o mecanismo descrito por Darwin parece ser realmente fundamental para a história da vida. Deixemos que os tentilhões se reproduzam em uma das ilhas Galápagos que Darwin visitou em sua juventude. Se as árvores dessa ilha produzem nozes com casca dura, ao longo do tempo os tentilhões com bico capaz de quebrar as cascas de forma mais eficiente sobreviverão melhor e produzirão mais descendentes do que outros. Esperemos algumas gerações e veremos que todos os tentilhões dessa ilha têm esse tipo de bico. Com o tempo, à medida que alguns indivíduos são selecionados pela “natureza” (na verdade, pelas regras do ambiente local), uma nova espécie acabará por surgir. Como Darwin mostrou, esse é o mecanismo básico da evolução biológica. Essa é a chave catraca da complexidade de Darwin; é assim que a vida constrói coisas cada vez mais complexas, passo a passo.

## AS CONDIÇÕES CACHINHOS DOURADOS PARA A VIDA

Como a vida surgiu pela primeira vez em algum lugar nos ricos e variados ambientes Cachinhos Dourados da jovem Terra?<sup>11</sup>

O que Darwin não sabia era que mecanismos semelhantes à seleção natural, em que mudanças aleatórias são eliminadas por regras locais, também podem funcionar de maneira rudimentar em um mundo sem vida. Onde há misturas complexas de elementos químicos e muita energia livre, podem surgir moléculas que estimulam a formação de outras moléculas e, eventualmente, criam as moléculas com as quais a reação começou. Trata-se de um ciclo autocatalítico, uma reação cujos componentes permitem, ou *catalisam*, a produção de outros componentes do ciclo, inclusive de seus ingredientes originais, para que o ciclo possa se repetir. Deflagre um desses ciclos e ele produzirá seus componentes em quantidades cada vez maiores à medida que extrai cada vez mais energia alimentar, até que comece a matar de fome outras reações menos bem-sucedidas. O ciclo pode até modificar-se ligeiramente se aparecerem novos tipos de alimento. Isso está começando a parecer a sobrevivência da reação química mais bem-sucedida. Desse modo, já temos aqui algo um pouco semelhante à vida, algo que pode persistir e se reproduzir, aproveitando a energia de seus arredores. “Antes de podermos ter reprodutores competentes”, escreve Daniel Dennett, “precisamos ter persistores competentes, estruturas com suficiente estabilidade para permanecer por tempo suficiente a fim de pegar revisões.”<sup>12</sup> Essa ideia de evolução química nos ajudará a explicar, pelo menos em termos gerais, como surgiram as precondições para a vida na jovem Terra.

A evolução química pode ocorrer apenas em um ambiente que permita uma rica experimentação química. E esses ambientes são extraordinariamente raros. Então, quais são as condições Cachinhos Dourados para a experimentação química? E por que a jovem Terra exibia tantas delas?

Em primeiro lugar, nosso sistema solar está na região certa da galáxia da Via Láctea. As estrelas nos subúrbios exteriores da galáxia têm nuvens de elementos químicos finos e quimicamente empobrecidos para trabalhar. Por sua vez, as estrelas muito próximas da zona central de negócios da galáxia são atingidas por ondas de choque das violentas explosões de buracos negros que se encontram em seu núcleo. Nosso sistema solar está no lugar certo. Sua órbita está a cerca de dois terços do caminho do centro da Via Láctea, no meio da “zona habitável” da nossa galáxia.

Em segundo lugar, a química funciona bem somente em temperaturas mais baixas. O universo primitivo era quente demais para os átomos se combinarem em moléculas. O mesmo acontece no interior das estrelas. A química fértil só é possível dentro de uma faixa estreita de temperaturas razoavelmente baixas, que se encontram em zonas habitáveis próximas das estrelas, mas não demasiado próximas. A órbita da nossa Terra está no meio da zona habitável do nosso Sol. Vênus e Marte orbitam nas bordas interna e externa, respectivamente, da zona habitável do nosso sistema. Mas estamos aprendendo que algumas luas mais afastadas do Sol, como a lua de Saturno chamada Encélado, também podem ter fornos e químicas internos que as tornam propícias à vida. Em 2017, cientistas descobriram que os oceanos de Encélado produzem hidrogênio, o gás que fornece alimento para alguns dos organismos mais antigos do planeta Terra.<sup>13</sup>

Uma terceira condição Cachinhos Dourados para a química fértil é a presença de líquidos. Em gases, os átomos parecem crianças hiperativas, por isso é difícil mantê-los quietos o suficiente para se engancharem com outros átomos. Nos sólidos, temos o problema oposto: os átomos estão trancados no lugar. Mas os líquidos são como salões de baile, e a água líquida, com seus sussurrantes laços de hidrogênio, oferece o melhor salão de baile de todos. Os átomos podem navegar, valsar e dançar tango, e não é muito difícil para os elétrons trocarem de parceiros se detectarem algo mais atraente. A presença de líquidos depende de química, temperatura e pressão. Existe uma faixa estreita de temperaturas em que a água existe na forma líquida (a maior parte da água no universo está na forma de gelo). Mas, nessas mesmas temperaturas, é possível encontrar também gases e sólidos, o que proporciona possibilidades químicas muito interessantes. Assim, devemos esperar que a química mais interessante esteja em planetas cujas temperaturas médias na superfície estejam entre 0 e 100 graus Celsius, respectivamente os pontos de congelamento e ebulição da água. Isso é raro, mas nossa Terra está exatamente à distância correta do Sol para ter água líquida.

Uma quarta condição Cachinhos Dourados necessária para a vida é a diversidade química. Não basta ter a temperatura certa se houver apenas hidrogênio e hélio para trabalhar. E hoje, mesmo nas regiões quimicamente ricas dentro das galáxias, o hidrogênio e o hélio ainda representam 98% de toda a matéria atômica. O que a química precisa é daqueles ambientes raros em que os outros elementos da tabela periódica são mais comuns. Em nosso sistema solar, essa diversidade só se encontra nos planetas rochosos próximos ao Sol, porque o jovem astro ferveu grande parte do hidrogênio e do hélio das órbitas internas do sistema

solar, deixando um destilado concentrado de todos os elementos da tabela periódica.

Assim que a jovem Terra congelou, seu lodo diversificado de substâncias químicas gerou carços de rocha, sólidos compostos de muitas diferentes moléculas simples misturadas. Os primeiros minerais da Terra também apareceram, provavelmente na forma de cristais simples, como grafite ou diamantes.<sup>14</sup>

Nesse ambiente quimicamente rico, muitas das moléculas simples a partir das quais a vida é construída podem se formar mais ou menos espontaneamente. Estamos falando de moléculas pequenas, com menos de cem átomos, como os aminoácidos de que são feitas todas as proteínas, os nucleotídeos de que é feito todo o material genético, os carboidratos ou açúcares que são frequentemente usados como baterias para armazenar energia, e os fosfolipídios gordurosos com os quais se constroem as membranas celulares. Hoje, essas moléculas não surgem espontaneamente porque o oxigênio atmosférico as separaria. Mas quase não havia oxigênio livre na atmosfera da Terra primitiva, de modo que essas moléculas simples podiam se formar quando recebiam alguns solavancos de energia de ativação.

Em 1952, numa tentativa para demonstrar isso, o jovem estudante de química da Universidade de Chicago Stanley Miller criou um modelo de laboratório da atmosfera primitiva da Terra, colocando água, amônia, metano e hidrogênio num sistema fechado de frascos e tubos. Ele aqueceu a mistura e a fulminou com cargas elétricas (equivalentes laboratoriais de vulcões e tempestades elétricas) para fornecer alguma energia de ativação. Dentro de alguns dias, Miller encontrou um lodo rosado de aminoácidos. Sabemos agora que outras moléculas orgânicas simples, como os fosfolipídios, também podem se formar em ambientes

desse tipo. Hoje, os resultados básicos de Miller ainda são válidos, embora saibamos que a atmosfera primitiva era dominada não por metano e hidrogênio, mas por vapor de água, dióxido de carbono e nitrogênio.

Desde então, aprendemos que muitas dessas moléculas podem se formar até mesmo em ambientes menos propícios à química do espaço interestelar, de modo que muitas moléculas orgânicas simples podem ter chegado à Terra, já prontas, dentro de cometas ou asteroides. Por exemplo, o meteorito Murchison, que caiu na Terra perto de Murchison, Austrália, em 1969, continha aminoácidos e várias das bases químicas que encontramos no DNA. Esses meteoritos eram muito mais comuns no início da história da Terra do que são hoje, o que sugere que a Terra primitiva já foi semeada com muitas das matérias-primas da vida e é bastante capaz de fabricar mais.

Mas a maioria das moléculas dentro das células, como proteínas ou ácidos nucleicos, é muito mais complexa do que essas moléculas simples. Elas consistem em polímeros, longas e delicadas cadeias de moléculas, e formar polímeros não é tão fácil. É preciso a quantidade certa de energia de ativação e de ambientes que podem aproximar as moléculas do jeito certo. Um ambiente na Terra primitiva que pode ter fornecido as condições adequadas para juntar polímeros encontra-se nas fontes (ou chaminés) hidrotermais, onde o material quente das vísceras da Terra jorra através do fundo do oceano. Esses ambientes eram protegidos da radiação solar e dos violentos bombardeios sobre a superfície. Eles também continham diversos elementos químicos, muita água e gradientes de calor e acidez, enquanto magmas quentes e quimicamente ricos infiltravam-se em águas oceânicas frias. As fontes alcalinas, descobertas recentemente, em 2000, proporcionam ambientes

particularmente promissores, e as rochas porosas que se formam nessas aberturas oferecem pequenos refúgios protegidos para experimentação química, como os frascos e tubos de Miller. É possível encontrar até superfícies semelhantes à argila com estruturas moleculares regulares que podem criar modelos físicos ou elétricos nos quais os átomos podem ser reunidos em padrões regulares e mantidos imóveis até formarem cadeias semelhantes a polímeros.

## DA QUÍMICA RICA À VIDA: LUCA, O ÚLTIMO ANCESTRAL COMUM UNIVERSAL

A vida apareceu no início da história do planeta Terra, e isso sugere que a criação de formas simples de vida talvez não seja tão difícil onde as condições corretas existam. Mas identificar o momento exato em que a vida apareceu é complicado porque os primeiros organismos viveram há mais de 3 bilhões de anos, porque eram microscópicos e porque as rochas em que estavam enterrados desapareceram pela erosão. Atualmente, a melhor evidência direta da mais antiga forma de vida na Terra consiste em fósseis microscópicos encontrados na remota região de Pilbara, na Austrália ocidental, em 2012. Eles parecem ser de bactérias que viveram há cerca de 3,4 bilhões de anos.<sup>15</sup> Em setembro de 2016, um artigo publicado na revista *Nature* descreveu fósseis de 3,7 bilhões de anos do que pareciam ser estromatólitos semelhantes a corais que foram encontrados na Groenlândia.<sup>16</sup> Se esses fósseis são o que muitos pensam, a vida deve ter começado a evoluir milhões de anos antes do que se acreditava anteriormente e deve ter surgido logo após o término do Bombardeio Pesado Tardio, cerca de 3,8 bilhões de anos atrás. E no início de 2017, com base em formações fósseis descobertas no norte do Quebec, cientistas alegaram que a vida poderia ter surgido já há 4,2 bilhões de anos; teremos de esperar para ver se essas alegações se sustentam.<sup>17</sup>

Os biólogos ainda não têm uma explicação completa sobre como os primeiros organismos vivos evoluíram. Mas eles compreendem muitos passos desse processo.

Embora não saibam exatamente que aparência tinha, os biólogos chamam o primeiro organismo vivo de Luca (ou LUCA, acrônimo em inglês de “último ancestral comum universal”). Luca certamente viveu antes das primeiras formas de vida que descobrimos até agora, e compartilhava muitas características com os modernos organismos conhecidos como procariontes (ou procariotas): organismos unicelulares cujo material genético não é protegido dentro de um núcleo. Hoje, os procariontes são encontrados em dois dos três grandes domínios dos organismos, Eubacteria e Archaea. (O terceiro, do qual nossa espécie faz parte, é o Eukarya.)

Nunca encontraremos fósseis de Luca porque Luca é, na verdade, uma criatura hipotética, uma espécie de imagem composta do primeiro organismo vivo, um pouco como um retrato falado de um criminoso em fuga. Ainda assim, esse retrato pode nos ajudar a entender como a vida começou.

Luca pode ter estado vivo, mas não completamente, em algum lugar na zona zumbi entre a vida e a não vida. Não se trata de uma ideia tão evasiva quanto parece. Os vírus não estão totalmente vivos porque não cumprem todos os requisitos de nossa definição de vida. Eles não têm metabolismo e apresentam membranas extremamente frágeis, então não está claro se podemos descrevê-los como células. São pouco mais que pacotes de material genético que grudam em organismos mais complexos. Eles entram em outra célula, sequestram os mecanismos metabólicos dela e usam-no para fazer cópias de si mesmos. Quando estamos com gripe, os vírus estão sugando energia de nossos dutos metabólicos. Mas, quando não conseguem encontrar células para sequestrar, os vírus se desligam e se escondem numa espécie de animação suspensa. Algumas células vivem profundamente nas rochas e têm

metabolismos extremamente lentos; elas sobrevivem com minúsculas sobras de água e nutrição. São capazes de se desligar completamente por longos períodos, como o guitarrista de rock Hotblack Desiato, no romance de Douglas Adams *O restaurante no fim do universo*, que passa um ano morto, para fins fiscais. O imposto que esses organismos evitam é evidentemente o imposto sobre a complexidade da entropia. Luca pode ter vivido numa zona crepuscular semelhante.

Retratos falados de Luca foram construídos graças à identificação de centenas de genes que estão presentes na maioria dos procariontes modernos e são provavelmente extremamente antigos. Eles sugerem o tipo de ambiente em que Luca evoluiu, porque nos dizem que tipo de proteína ele fabricava para sobreviver.<sup>18</sup>

O composto Luca (ou família de Lucas, porque estamos falando de bilhões deles) podia se ajustar a mudanças em seu ambiente. Ele tinha um genoma, então podia se reproduzir. E ele evoluiu. Luca talvez não tivesse sua própria membrana e seu próprio metabolismo. Suas paredes celulares eram provavelmente feitas de rocha vulcânica porosa, e seu metabolismo dependia de fluxos geoquímicos de energia sobre os quais tinha pouco controle. As proteínas que Luca produzia sugerem que ele vivia na beira de fontes hidrotermais oceânicas alcalinas, provavelmente dentro de minúsculos poros em rochas semelhantes a lavas, e obtinha sua energia de gradientes próximos de calor, acidez e fluxos de prótons e elétrons. As estranhas químicas de Luca provavelmente se espalhavam em líquidos quentes de dentro da Terra que eram alcalinos, o que significava que tinham excesso de elétrons. Do lado de fora dos poros vulcânicos que Luca chamava de lar estavam as águas mais frias do oceano que eram mais ácidas, o que significava que tinham excesso de prótons. Como uma bateria carregada, o minúsculo gradiente elétrico

entre o interior de Luca e o mundo exterior fornecia a energia livre necessária para impulsionar seu metabolismo, atrair nutrientes de fora e expelir materiais residuais.

Eis como Nick Lane, um dos pioneiros dos estudos dos inícios da vida, descreve Luca:

Ele [Luca] não era uma célula de vida livre, mas um labirinto rochoso de células minerais, revestidas com paredes catalíticas compostas de ferro, enxofre e níquel, e energizadas por gradientes naturais de prótons. A primeira vida era uma rocha porosa que gerava moléculas e energia complexas, até a formação de proteínas e o próprio DNA.<sup>19</sup>

Embora simples em comparação com organismos modernos, Luca já continha muitos dispositivos bioquímicos puros, entre eles muitas das receitas para a maquinaria metabólica e reprodutiva das células modernas. Provavelmente tinha um genoma baseado em RNA, de modo que pudesse se reproduzir com muito mais precisão e exatidão do que meras substâncias químicas, e isso sugere que pode ter evoluído rapidamente. Ele também usava os fluxos de energia que acessava para produzir ATP (trifosfato de adenosina), a mesma molécula que transporta energia dentro das células modernas.

## DE LUCA A PROCARIONTES

Luca e seus parentes já haviam feito grande parte do trabalho pesado necessário para desenvolver os primeiros organismos vivos verdadeiros. Mas Luca carecia de uma membrana que pudesse carregar para onde quer que fosse e de um metabolismo que não estivesse ligado a fluxos de energia perto de fontes vulcânicas. Parece que Luca também não tinha o mecanismo reprodutivo mais sofisticado que está presente na maioria dos organismos modernos e se baseia no parente próximo do RNA, a dupla hélice do DNA. No momento, sabemos que precisava evoluir, mas não entendemos os caminhos exatos pelos quais essas coisas evoluíram.

Explicar a evolução das membranas protetoras pessoais não é muito difícil. As membranas celulares são feitas de longas cadeias de fosfolipídios, e não é difícil persuadi-los a se unirem em camadas que formem estruturas semipermeáveis semelhantes a bolhas sob as condições corretas. Talvez, como Terrence Deacon argumentou, as reações autocatalíticas tenham evoluído e gerado camadas fosfolipídicas, molécula por molécula. Se assim foi, talvez não seja muito fantasioso imaginar alguma versão de Luca tricotando para si mesmo uma membrana pessoal.<sup>20</sup>

Explicar como as células desenvolveram melhores maneiras de obter energia e se reproduzir é mais complicado, mas os mecanismos envolvidos são tão fundamentais e tão elegantes que vale a pena tentar entender como eles funcionam.

Desenvolver novas maneiras de acessar os fluxos de energia de modo que as células pudessem se afastar das fontes vulcânicas significava criar o equivalente celular de uma rede elétrica em que as moléculas pudessem

se ligar enquanto realizavam seu trabalho. As enzimas tiveram um papel crucial nisso. Trata-se de moléculas especializadas que podem agir como catalisadores, acelerando as reações celulares e reduzindo a energia de ativação necessária para fazê-las funcionar. Hoje, as enzimas desempenham um papel fundamental em todas as células. A maioria das enzimas são proteínas compostas de longas cadeias de aminoácidos. A sequência exata de aminoácidos é importante, porque ela determina como a proteína se dobrará na forma precisa de que necessita para realizar seu trabalho específico. As enzimas atravessam o lodo molecular, procurando por moléculas-alvo nas quais se encaixam, do mesmo modo que uma chave inglesa se ajusta a uma porca ou parafuso específico. Em seguida, a enzima usa minúsculos disparos de energia para acessar, dobrar, rachar ou dividir a molécula, ou ligá-la a outras moléculas. A maioria das reações em nosso corpo não poderia acontecer sem enzimas ou exigiria energias de ativação tão altas que danificariam a célula.

Depois que a enzima pôs sua molécula-alvo em forma, ela se separa e vai caçar outras moléculas que possa dobrar à sua vontade. As enzimas também podem ser ativadas ou desativadas por outras moléculas que se ligam a elas e alteram ligeiramente sua forma, e é assim que, como os bilhões de transistores em um computador, as enzimas governam as reações fantasticamente complexas que ocorrem dentro das células.

As enzimas obtêm a energia de que precisam para fazer seu trabalho do equivalente celular da rede elétrica. Trata-se de um sistema que deve ter evoluído muito cedo na história da vida. A energia é transportada para enzimas e outras partes da célula por moléculas de ATP, ou trifosfato de adenosina, e o ATP provavelmente já estava dando duro dentro de Luca. Enzimas e outras moléculas acessam a energia do ATP rompendo um pequeno grupo de átomos, liberando a energia que liga

esse grupo à molécula. A molécula empobrecida (agora denominada ADP, difosfato de adenosina) segue então para moléculas geradoras especiais que a recarregam substituindo os átomos perdidos. As moléculas geradoras são alimentadas por um processo notável chamado *quimiosmose*, que foi descoberto somente na década de 1960, mas parece que funcionava desde a época de Luca. Dentro de cada célula, as moléculas alimentares são decompostas para capturar a energia que contêm, e parte dessa energia é usada para bombear prótons de dentro da célula (onde há uma baixa concentração de prótons) para fora da célula (onde há uma alta concentração de prótons). Trata-se de um processo semelhante a carregar uma bateria. Esse processo cria um gradiente elétrico entre o exterior e o interior da célula, com uma voltagem semelhante à que Luca pode ter usado em fontes alcalinas. Moléculas geradoras especiais (ATP sintase, para os entendidos) que estão embutidas nas membranas celulares usam a voltagem elétrica criada pelos prótons que retornam de fora da membrana para impulsionar nanorrotores. Assim como as linhas de montagem rotativas, os rotores carregam as moléculas de ADP, substituindo o grupo de moléculas que perderam, e então as moléculas de ATP carregadas voltam para a célula e esperam que outras moléculas se conectem a elas e obtenham a energia de que precisam para continuar trabalhando.

Hoje, essa rede elétrica celular elegante está presente em todas as células. Ela libertou as células dos fluxos de energia em torno das fontes vulcânicas e possibilitou que os primeiros procariontes vagassem pelos oceanos da Terra, capturando energia das moléculas alimentares e usando-as para criar moléculas de ATP que poderiam fornecer a energia necessária para alimentar as vísceras da célula.

Esses delicados fluxos de energia mantiveram as complexas estruturas internas das células, assim como a fusão mantém as estruturas das estrelas. Como a fusão, permitiram que as primeiras células vivas pagassem os impostos da complexidade exigidos pela entropia, porque nas células, como nas estrelas, muita energia é usada para manter em funcionamento estruturas complexas. Mas, também como nas estrelas, muita energia é desperdiçada porque nenhuma reação é 100% eficiente e, é claro, a entropia adora energia desperdiçada. Tanto nas células quanto nas estrelas, fluxos concentrados de energia são necessários para pagar os impostos da entropia e superar a tendência universal à degradação de todas as coisas.

Nos organismos vivos, a energia tem uma nova função que não encontramos nas estrelas: ela cria cópias da célula. Essas cópias permitem que as células reajam à entropia, preservando suas estruturas complexas mesmo após a morte de células individuais. Os descendentes de Luca desenvolveram os métodos elegantes e eficientes de reprodução que todos os seres vivos ainda usam hoje. Esses métodos baseiam-se numa molécula fundamental, o DNA, cuja estrutura foi descrita pela primeira vez em 1953 por Francis Crick e James Watson, com base em pesquisas anteriores feitas por Rosalind Franklin. Há tantos aspectos da evolução que dependem da compreensão do funcionamento do DNA que vale a pena olhar com mais cuidado para essa molécula maravilhosa.

O DNA (ácido desoxirribonucleico) está intimamente relacionado ao RNA (ácido ribonucleico). Ambos são polímeros, longas cadeias de moléculas semelhantes. Mas, enquanto as proteínas são feitas de cadeias de aminoácidos, e as membranas são feitas de fosfolipídios, o DNA e o RNA são feitos de longas cadeias de nucleotídeos. Trata-se de moléculas de açúcar às quais estão ligados pequenos grupos de moléculas

conhecidas como bases. As bases têm quatro tipos: adenina (A), citosina (C), guanina (G) e timina (T). (No RNA, a timina é substituída pela uracila, U.) E aqui está a mágica: como mostraram Crick e Watson, essas quatro bases podem ser usadas como letras de um alfabeto para transportar grandes quantidades de informação. Conforme as moléculas de DNA ou RNA se ligam para formar enormes cadeias, as bases se projetam para o lado, formando uma longa cadeia de As, Cs, Gs e Ts (ou Us no RNA). Cada grupo de três letras é um código para um aminoácido específico ou contém uma instrução, como *Pare de ler agora*. Assim, a sequência TTA diz: *Adicione uma molécula do aminoácido leucina*, enquanto TAG é uma espécie de sinal de pontuação que diz: *O.k., pode parar de copiar agora*.

As informações sobre as moléculas de DNA e RNA podem ser lidas e copiadas porque as bases gostam de se conectar umas às outras usando ligações de hidrogênio, que podem ser feitas e desfeitas facilmente. Mas elas se ligam somente de maneiras muito específicas. Uma base A sempre se une a T (ou U no RNA) e C a G. Enzimas especiais expõem trechos do DNA que correspondem a um gene ou código específico de uma determinada proteína, e cada base atrai seu oposto para criar uma nova cadeia curta de RNA de nucleotídeos complementares à cadeia original. O segmento recém-criado é então levado rapidamente para uma grande molécula conhecida como ribossomo, que é uma espécie de fábrica de proteínas. O ribossomo lê a sequência de trios de letras e expele os aminoácidos correspondentes, um a um, na ordem correta para produzir uma proteína específica, que então entra na célula para realizar seu trabalho. Dessa forma, os ribossomos podem fabricar todos os milhares de proteínas de que uma célula precisa.

O último lance de magia é que as moléculas de DNA e RNA podem usar esses mecanismos de cópia para fazer cópias de si mesmas e de todas as informações que contêm. As bases que se projetam para o lado, de suas cadeias de açúcar-fosfato, chegam ao lodo celular e agarram-se a seus complementos. Assim, Cs sempre se agarram a Gs e As sempre se agarram a Ts (ou Us, no RNA). As bases recém-fixadas atraem novas moléculas de açúcar, que se ligam umas às outras, formando assim uma nova cadeia que é o complemento exato da primeira. No DNA, essas duas cadeias complementares normalmente permanecem juntas, razão pela qual o DNA geralmente existe na forma de uma cadeia ou hélice dupla, como um par de escadas em caracol. Ele pode ser enrolado tão apertado que se encaixa perfeitamente dentro de cada célula, e só é desenrolado para ser lido ou para fazer cópias de si mesmo. No entanto, o RNA existe normalmente como uma cadeia única e assim, como uma proteína, também pode se dobrar em formas particulares e funcionar como uma enzima.

Essa pequena diferença entre o RNA e o DNA é imensamente importante porque significa que, embora o DNA funcione normalmente apenas como um repositório de informações genéticas, o RNA pode tanto armazenar informações quanto fazer trabalho químico. É tanto hardware quanto software, e é por isso que a maioria dos pesquisadores acredita que houve um tempo, talvez quando Luca ainda estava por aqui, em que a maioria das informações genéticas era transportada pelo RNA. Luca provavelmente viveu nesse mundo de RNA. Mas o RNA é um portador de informações menos seguro do que o DNA, porque sua informação é constantemente atacada no violento mundo interior da célula, enquanto as hélices duplas do DNA protegem suas preciosas informações do redemoinho externo. Em um mundo de RNA, a informação genética

poderia facilmente se perder ou ser distorcida. A evolução só começou depois do desenvolvimento de um mundo de DNA pelos descendentes de Luca, os verdadeiros procariontes, que dominam hoje o mundo dos micro-organismos.

Com membranas próprias, metabolismo independente e uma maquinaria genética mais precisa e estável, os primeiros procariontes podiam deixar as fontes vulcânicas nas quais nasceram e viajar pelos oceanos da Terra primitiva. É provável que já fizessem isso há 3,8 bilhões de anos.

Cada procariota é um reino inteiro de complexidade inacreditável. Bilhões de moléculas nadam numa lama química espessa, sendo empurradas e puxadas por outras moléculas milhares de vezes por segundo, mais ou menos como um turista num mercado lotado, cheio de comerciantes, camelôs e batedores de carteiras. Se você fosse injetado numa dessas moléculas, acharia um mundo aterrorizante. As enzimas tentarão se apropriar de você e mudá-lo, talvez conectá-lo a outras moléculas para formar uma nova equipe que possa cruzar os mercados em busca de novas oportunidades. Imaginemos milhões dessas interações acontecendo dentro de cada célula a cada segundo e teremos uma ideia da atividade frenética que move até mesmo a mais simples das células da biosfera inicial.

Trata-se de um mundo novo e de um novo tipo de complexidade. Tais como estrelas e planetas formados durante períodos de mudança caótica, as células acabaram se fixando numa espécie de estabilidade quando começaram a administrar pequenas flutuações em seus ambientes e a reagir contra elas. As células alcançariam um equilíbrio temporário; o mesmo aconteceria com espécies e linhagens inteiras e grupos de espécies. Mas nunca houve um equilíbrio estático. Sempre foi dinâmico,

sempre mantido por uma constante negociação entre organismos vivos e ambientes em mutação, e sempre correndo o perigo de um colapso repentino.

## 5. A vida pequena e a biosfera

*Para dar a Estha e Rahel uma noção de Perspectiva Histórica [...] Chacko [...] contou-lhes sobre a Mulher Terrena. Ele os fez imaginar que a Terra — de quatro bilhões e seiscentos milhões de anos de idade — era uma mulher de quarenta e seis anos. [...] Demorou toda a vida da Mulher Terrena para que a Terra se tornasse o que era. Para os oceanos se separarem. Para as montanhas se levantarem. A Mulher Terrena tinha onze anos de idade, disse Chacko, quando surgiram os primeiros organismos unicelulares.*

Arundhati Roy, *O deus das pequenas coisas*

Juntas, Terra e vida compõem a biosfera.<sup>1</sup> A palavra “biosfera” foi cunhada pelo geólogo austríaco Eduard Suess (1831-1914). Ele via a Terra como uma série de esferas que se sobrepunham e, às vezes, se interpenetravam, da qual faziam parte a atmosfera (a esfera do ar), a hidrosfera (a esfera da água) e a litosfera (os níveis rígidos e superiores da Terra, como a crosta e as camadas superiores do manto). Mas foi o geólogo russo Vladímir Vernadski (1863-1945) quem mostrou pela primeira vez que a esfera da vida moldou a história planetária tanto quanto as outras esferas não vivas. Podemos pensar na biosfera como um envoltório fino de tecido vivo (e os restos e impressões de tecido vivo)

que vai das profundezas dos oceanos à superfície da Terra e até a atmosfera mais baixa. Na década de 1970, James Lovelock e Lynn Margulis mostraram que a biosfera pode ser pensada como um sistema com muitos mecanismos de feedback que permitem que ela se estabilize na ausência de grandes choques. Lovelock chamou esse vasto sistema autorregulador de Gaia, nome da deusa grega da Terra.

## GEOLOGIA: COMO FUNCIONA O PLANETA TERRA

A vida levou algum tempo para começar, então iniciemos por considerar o planeta Terra como um sistema puramente geológico, como um cenário antes de os atores chegarem. Isso deve facilitar a compreensão dos dramas complexos que serão representados mais tarde pelos organismos vivos.

Os processos violentos de acreção e diferenciação que forjaram a jovem Terra deixaram uma bola quimicamente rica de matéria separada em camadas distintas. Havia um núcleo quente e semiderretido, feito principalmente de ferro e níquel, que gerava um campo magnético protetor ao redor da Terra. Em volta do núcleo havia uma camada de gás, água e rocha semiderretida de 3 mil quilômetros de espessura, o manto terrestre. As rochas mais leves subiram à superfície e formaram a crosta terrestre. Gases e vapor de água borbulharam pelos vulcões para criar a primeira atmosfera da Terra e os oceanos. Meteoros e asteroides trouxeram novas cargas de rochas, minerais, água, gases e moléculas orgânicas.

Há cerca de 3,8 bilhões de anos, quando o bombardeio do espaço diminuiu, o principal fator de mudança geológica era o calor enterrado no núcleo da Terra. Esse calor penetrou no manto, na crosta e na atmosfera terrestre, revolvendo o material de cada camada, transformando-o quimicamente e movendo grandes quantidades de matéria e gás em ciclos de convecção enormes e lentos. Tal como a evolução das estrelas, a evolução geológica de nossa Terra foi impulsionada principalmente por processos simples que se alimentavam de uma reserva inicial de energia não renovável. A Terra mudava à

medida que fazia suar calor do núcleo através do manto e da crosta e o expelia para o espaço.

O calor do núcleo ainda impulsiona muita geologia e continuará a fazê-lo por bilhões de anos. Mas foi somente na década de 1960 que os geólogos descobriram como essa enorme máquina geológica funcionava. A nova compreensão da geologia baseou-se em um dos paradigmas mais importantes da ciência moderna: placas tectônicas.

Os seres humanos só conseguiram visualizar a superfície da Terra nos últimos quinhentos anos, quando, pela primeira vez, conseguiram circum-navegá-la. Mas a maioria das pessoas continuou a supor que, em grandes escalas, a geografia do mundo era mais ou menos fixa. Os vulcões podem entrar em erupção e os rios mudam de curso, mas tinha-se por certo que a disposição de continentes e oceanos, de montanhas, rios e desertos, de calotas polares e cânions era imutável. Mas alguns passaram a ter dúvidas. E, assim como Darwin mostrou que a vida havia mudado profundamente ao longo das eras, começaram a acumular-se indícios de que a Terra também tinha uma história de mudanças profundas.

Em 1885, Eduard Suess sugeriu que, por volta de 200 milhões de anos antes, todos os continentes estavam reunidos em um supercontinente. Sabemos agora que ele estava absolutamente certo. Três décadas depois, Alfred Wegener, um meteorologista alemão que fez pesquisas na Groenlândia, reuniu muitos indícios que sustentavam a ideia de Suess. Wegener os publicou em 1915, no meio da Primeira Guerra Mundial, num livro intitulado (talvez numa alusão à *Origem das espécies* de Darwin) *A origem dos continentes e dos oceanos*. Assim como Darwin propunha que os organismos vivos haviam evoluído, Wegener propôs que continentes e oceanos haviam evoluído, por um mecanismo que

chamou de deriva continental. Outrora reunidos no supercontinente da Pangeia, ou Pangaia (palavra grega que significa “toda a terra”), eles gradualmente se afastaram e se moveram para suas posições atuais.

Wegener ofereceu muitos indícios. Num mapa-múndi, muitas partes *pareciam* se encaixar, algo que as pessoas haviam notado desde a criação dos primeiros mapas do mundo, no século XVI. Pouco antes de 1600, o cartógrafo holandês Abraham Ortelius comentou que a América parecia ter sido “arrancada” da Europa por alguma catástrofe.<sup>2</sup> Se olharmos para um mapa-múndi moderno, veremos que o ombro do Brasil se encaixa bem na axila da África ocidental e central, enquanto a África ocidental parece se encaixar perfeitamente no enorme arco do Caribe. Na década de 1960, os geólogos perceberam que o ajuste é ainda maior quando se examinam as bordas das plataformas continentais.

Wegener mostrou que havia fósseis quase idênticos de répteis antigos na América do Sul e na África central e meridional. O cientista alemão do início do século XIX Alexander von Humboldt, um dos primeiros estudiosos a escrever uma história moderna das origens baseada na ciência, também notara semelhanças entre as plantas costeiras da América do Sul e as da África.<sup>3</sup> Depois, havia camadas de rochas que pareciam começar na África ocidental e continuar no leste do Brasil sem interrupção. Como meteorologista, Wegener estava particularmente interessado em provas climáticas. Na África tropical, encontram-se os arranhões e sulcos reveladores de geleiras em movimento. Poderia a África tropical ter cercado o polo Sul? Na Groenlândia, Wegener encontrou fósseis de plantas tropicais. Algo certamente se movera por longas distâncias no passado remoto.

Mas é preciso mais do que alguns indícios sugestivos para levantar uma boa hipótese científica. A publicação no meio da Primeira Guerra

Mundial não ajudou na defesa da causa de Wegener, e o fato de ele ser alemão e não ser geólogo fez com que poucos geólogos do mundo de língua inglesa levassem suas ideias a sério. Seria *realmente* possível que continentes inteiros pudessem arrastar-se pelos oceanos? Wegener não tinha ideia de que força os teria empurrado, e aos olhos da maioria dos geólogos profissionais a ausência de uma explicação era suficiente para liquidar com a hipótese. Em novembro de 1926, a teoria da deriva continental de Wegener foi decisivamente rejeitada pela influente Associação Americana de Geólogos do Petróleo. E isso parecia encerrar a questão.

Acontece que alguns geólogos ficaram intrigados. O geólogo britânico Arthur Holmes argumentou em 1928 que o interior da Terra poderia ser quente o suficiente para agir como um líquido em movimento lento, como a lava. Se assim fosse, o movimento do material dentro da Terra talvez pudesse fazer flutuar continentes inteiros no globo. Mas foi somente na década de 1950 que novas provas mostraram que Wegener, Holmes e outros defensores da ideia da deriva continental vinham seguindo a pista geológica certa.

Foi quando o sonar (acrônimo de “navegação e determinação da distância pelo som” em inglês) entrou na história. A tecnologia do sonar é capaz de detectar e localizar objetos submersos enviando sinais sonoros até eles e analisando os ecos que retornam. Muitos animais usam sonar, entre eles golfinhos e morcegos. A tecnologia do sonar humano, tal como a datação radiométrica, foi um produto da ciência de guerra — nesse caso, das tentativas de detectar submarinos inimigos. Harry Hess, professor de geologia em Princeton, era comandante naval durante a Segunda Guerra Mundial e usara o sonar para rastrear submarinos alemães. Depois da guerra, ele usou o sonar para mapear o fundo do

mar, que ainda era um território desconhecido para os geólogos marinhos. A maioria esperava que o fundo do mar consistisse em um limo plano que fora lavado dos continentes. Em vez disso, Hess encontrou cadeias de montanhas vulcânicas que atravessavam o oceano Pacífico. Nenhum geólogo esperava por isso. Depois de descobrir, no início dos anos 1950, uma cadeia similar que atravessava o meio do Atlântico, ele começou a desenvolver uma teoria para explicar essas cristas montanhosas no meio dos oceanos. Sua tarefa foi ajudada pelo paleomagnetismo, o estudo do magnetismo do fundo do mar. Já se sabia que, em intervalos de até algumas centenas de milhares de anos, os polos magnéticos Norte e Sul da Terra haviam trocado de lugar muitas vezes. Esses saltos deixavam rastros na lava que se infiltrava pelo fundo do oceano e assumiam a orientação magnética predominante à medida que se solidificavam. Medições da orientação magnética das rochas em ambos os lados das cristas vulcânicas mostravam uma série de saltos norte/sul à medida que se afastavam das cristas. Isso intrigou Hess.

Por fim, Hess descobriu que as cadeias de montanhas submarinas estavam sendo criadas pelo magma espremido por rachaduras na crosta oceânica. Isso fazia sentido, porque a crosta oceânica é mais fina que a crosta continental, de modo que ela pode ser facilmente perfurada pelo magma quente. À medida que o magma subia por rachaduras na crosta do fundo do mar, ele separava a crosta, criando um novo fundo do mar que trazia impressa a orientação magnética do período em que se formara. O magnetismo alternado das rochas do meio do oceano forneceu uma maneira de datar a formação dessas cadeias de montanhas subaquáticas.

Por trás dessas descobertas estava o motor da deriva continental que Wegener procurara em vão. Cadeias de montanhas, continentes e o

fundo do mar foram criados e empurrados por enormes quantidades do magma quente que subiu do manto terrestre e jorrou através de rachaduras na crosta do fundo do mar. O magma foi aquecido por elementos radioativos e pelo calor do núcleo da Terra, que retinha grande parte da energia armazenada durante os processos violentos de acreção e construção do planeta. E lá no núcleo dele estava o motor desaparecido. Como a fusão no centro de uma estrela, o calor que vaza do centro da Terra conduz os processos geológicos mais importantes na superfície.

Hoje, temos provas abundantes de que a crosta terrestre, tanto oceânica quanto continental, está dividida em placas distintas que disputam espaço enquanto são arrastadas para trás e para a frente pelo magma semiderretido sobre o qual flutuam. Magmas quentes que vêm das profundezas da Terra circulam sob a crosta, como água fervendo numa panela. São essas correntes de convecção de rochas semilíquidas e lava que movem as placas tectônicas que flutuam acima delas. Estudos detalhados de bandas paleomagnéticas possibilitaram que os cientistas traçassem os movimentos das placas ao longo de centenas de milhões de anos, dando-nos uma ideia cada vez mais precisa da geografia cambiante da Terra ao longo dos últimos bilhões de anos aproximadamente. Sabemos agora que esses movimentos criaram supercontinentes como a Pangeia e depois os separaram várias vezes em um processo cíclico que provavelmente começou no início do éon proterozoico, há cerca de 2,5 bilhões de anos. Antes disso, provavelmente não havia grandes continentes. Mas alguns geólogos sustentam que o maquinário da tectônica das placas pode ter sido acionado muito antes. Indícios do éon hadeano sugerem que alguma forma de placas tectônicas já estava em

ação há 4,4 bilhões de anos, assim que a Terra se diferenciou em camadas distintas.<sup>4</sup>

Tal como a cosmologia do big bang, a tectônica das placas foi uma poderosa ideia unificadora. Ela explicou e mostrou as ligações entre muitos processos diferentes, desde terremotos até a construção de montanhas e o movimento dos continentes. Ela explica por que tantos eventos geológicos violentos ocorrem onde as placas tectônicas se encontram e passam por cima ou por baixo umas das outras. A tectônica das placas também explica por que a superfície da Terra é tão dinâmica, pois é continuamente renovada pela chegada de novos materiais do manto terrestre, enquanto o material da superfície sofre, por sua vez, subducção para o fundo na Terra.

Para entender como a tectônica das placas funciona em detalhes, vale a pena concentrar-se nas bordas entre as placas tectônicas. Em *margens divergentes*, como as descritas por Harry Hess, o material sobe do manto e separa as placas. Em outros lugares, porém, nas *margens convergentes*, as placas são unidas. Se as duas placas tiverem aproximadamente a mesma densidade — digamos que ambas consistam em placas continentais graníticas —, então, como duas morsas machos competindo por parceiras, elas se empinarão. Foi assim que o Himalaia se formou: nos últimos 50 milhões de anos, a rápida placa indiana viajou para o norte da Antártica e bateu na placa asiática. Mas, se duas placas convergentes têm densidades diferentes — digamos que uma consiste em crostas oceânicas pesadas e basálticas e a outra em crosta continental granítica mais leve —, a história é diferente. A placa oceânica mais pesada mergulhará sob a placa mais leve numa zona de subducção. Ele viajará para baixo, como um elevador descontrolado que cai e atravessa um piso de concreto, levando material da crosta de volta ao manto, onde

se dissolve. A placa descendente, ao perfurar o manto, gera tanto atrito e calor que pode derreter a crosta acima dela, dividindo-a e erguendo novas cadeias de montanhas vulcânicas. Foi assim que se formaram os Andes, quando a placa do Pacífico se enterrou embaixo da placa que carregava a costa oeste da América do Sul.

Por fim, há as *margens de transformação*. Aqui, as placas avançam como se fossem dois pedaços de lixa juntos, mas empurrados em direções opostas. O atrito vai parar as placas que deslizam até que se acumule tanta pressão que ocorra uma sacudida repentina e violenta. Essa é a fonte da pressão acumulada ao longo da falha de San Andreas, na costa oeste da América do Norte. (Ao morar por um tempo em San Diego, eu sentia ocasionalmente tremores e, como muitos californianos, precisei fazer um seguro contra terremotos.)

A circulação de materiais entre a atmosfera, a superfície e o manto terrestres causou um impacto profundo na química das camadas superiores da Terra. Ela gerou novos tipos de rochas e minerais. Quando a vida começou a florescer sobre a terra, os processos químicos dentro do manto já haviam criado até 1,5 mil tipos distintos de minerais.<sup>5</sup> A tectônica das placas deu ao planeta Terra um dinamismo químico e geológico excepcional.

A tectônica das placas também afetou as temperaturas na superfície da Terra jovem, e já vimos como foi crucial a temperatura certa para a história da vida no planeta. Duas forças principais determinam as temperaturas médias na superfície da Terra: calor do interior e calor do Sol. São temperaturas que podemos calcular aproximadamente. Mas a composição da atmosfera ajuda a determinar quanto calor é retido na superfície da Terra e quanto vaza para o espaço. Particularmente importante é a proporção de gases de efeito estufa. São gases como o

dióxido de carbono e o metano, que aprisionam a energia da luz solar em vez de refleti-la de volta ao espaço. Grandes quantidades de gases de efeito estufa geralmente significam uma Terra mais quente. Então, o que controla os níveis de gases de efeito estufa?

O astrônomo Carl Sagan (um dos grandes pioneiros de uma história moderna das origens) ressaltou que responder a essa questão é vital, porque pode resolver outro enigma. Estrelas como o nosso Sol emitem mais e mais energia à medida que envelhecem, de modo que a quantidade de calor que chega à Terra aumentou lentamente. Quando a Terra era jovem, o Sol emitia 30% menos energia do que hoje. Então, por que a Terra primitiva não era uma bola de gelo e demasiado fria para a vida se formar, como Marte hoje? Carl Sagan chamou esse problema de “paradoxo do Sol fraco”.

Descobriu-se que a resposta estava na quantidade de gases de efeito estufa no início da atmosfera. Seus níveis eram altos o suficiente para aquecer a jovem Terra de modo que a vida pudesse evoluir. Não havia praticamente nenhum oxigênio livre na primeira atmosfera da Terra, mas havia muitos gases do efeito estufa, particularmente vapor de água, metano e dióxido de carbono, expelidos do manto terrestre através de vulcões ou trazidos por asteroides. Uma atmosfera de estufa era mais uma importante condição Cachingos Dourados para a vida na jovem Terra.

Mas quão estável era essa atmosfera inicial de estufa? Ou, em termos gerais, o que garantia que, à medida que o Sol começasse a emitir mais energia, a superfície da Terra permaneceria dentro da faixa de temperatura mágica de 0 a 100 graus Celsius? Na década de 1970, James Lovelock e Lynn Margulis argumentaram que parecia haver poderosos mecanismos de autorregulação que mantinham a superfície da Terra

dentro da faixa Cachinhos Dourados. Como vimos, eles chamaram esse algo de Gaia. Gaia consistia na soma total das relações entre a geologia da Terra e seus organismos vivos que a mantinham propícia à vida. Muitos cientistas permanecem céticos quanto à hipótese de Gaia. Mas o que está claro é que realmente existem mecanismos de feedback dentro da biosfera, e muitos agem como termostatos para regular parcialmente a temperatura na superfície da Terra. Alguns mecanismos são geológicos, mas outros funcionam através de organismos vivos.

Um dos mais importantes desses termostatos é puramente geológico e por isso deve ter começado a funcionar antes mesmo que houvesse vida na Terra. Ele liga a tectônica e outro fator da mudança planetária: a erosão. Enquanto a tectônica carrega montanhas para o alto, a erosão as desgasta para baixo. O vento, a água e fluxos químicos de vários tipos quebram as rochas das montanhas e as empurram para baixo em direção a um gradiente gravitacional nos oceanos. A erosão explica por que as montanhas não são muito mais altas do que são; a tectônica explica por que elas não desapareceram e deram lugar a uma única e vasta planície global. A erosão é ela mesma um subproduto da tectônica, porque tanto o vento quanto a chuva foram arrotados das entranhas da Terra. E a construção de montanhas pode acelerar a erosão, à medida que a gravidade transforma os rios das montanhas em torrentes destrutivas que arrancam a terra e transportam os solos rapidamente em direção ao oceano.

Eis como funciona o termostato geológico. O dióxido de carbono, um dos mais poderosos gases do efeito estufa, se dissolve na chuva e chega à Terra na forma de ácido carbônico. Ele dissolve materiais das rochas, e os subprodutos dessas reações, que contêm muito carbono, são arrastados para o oceano. Ali, parte do carbono fica preso em rochas carbonáticas.

Onde placas tectônicas mergulham de volta no manto terrestre em zonas de subducção, parte desse carbono (grande parcela na forma de calcário) pode ficar enterrada no manto por milhões, até bilhões, de anos. Desse modo, a esteira rolante tectônica remove carbono da atmosfera, e isso deve finalmente reduzir os níveis de dióxido de carbono e gerar climas mais frios. Hoje sabemos que há muito mais carbono enterrado no manto terrestre do que está presente na superfície ou na atmosfera da Terra.

É evidente que, se dióxido de carbono em demasia fosse enterrado dessa maneira, a Terra congelaria. Isso foi impedido (na maior parte do tempo) pela segunda característica do termostato geológico. Impulsionado pela tectônica das placas (um mecanismo que provavelmente não funciona no gelado Marte), o dióxido de carbono pode retornar à atmosfera em zonas divergentes, onde os materiais do manto terrestre, entre eles o dióxido de carbono enterrado, sobem para a superfície através dos vulcões.<sup>6</sup> Há um equilíbrio entre as duas metades desse mecanismo, porque temperaturas mais altas geram mais chuva, o que acelera a erosão, levando mais carbono de volta ao manto. Mas, se a Terra esfriar demais, as chuvas diminuirão, menos dióxido de carbono será enterrado, os níveis de dióxido de carbono se acumularão à medida que são bombeados pelos vulcões e isso aquecerá as coisas novamente. O termostato geológico tem se ajustado ao crescente calor do Sol ao longo de 4 bilhões de anos.<sup>7</sup>

Tanto quanto se saiba, nada parecido com isso acontece em outros planetas de nosso sistema solar. Vênus sugere que a Terra poderia ter sido parecida se um excesso de dióxido de carbono tivesse permanecido na atmosfera. Hoje, a atmosfera de Vênus contém enormes quantidades dessa substância e o planeta parece ter sofrido um efeito estufa

descontrolado. Sua superfície é quente o suficiente para vaporizar a água e derreter o chumbo. Marte tomou o outro caminho errado. Era pequeno demais para que sua gravidade segurasse os gases do efeito estufa, então eles se dispersaram; o planeta esfriou e a maior parte de sua água existe agora na forma de gelo. O robô Curiosity, ao rastejar pela superfície de Marte, mostrou que houve um tempo, bilhões de anos atrás, em que houve água em sua superfície e formas simples de vida podem ter florescido. Mas esse tempo já passou. De qualquer modo, Marte e Vênus não parecem fazer placas tectônicas, o que os priva de um componente fundamental do termostato do nosso planeta. Marte era pequeno demais para reter o calor interno necessário para impulsionar a tectônica, e Vênus, ao ferver a maior parte de sua água, pode ter privado a tectônica do lubrificante aquoso que ajudou as placas a passarem por cima e por baixo umas das outras.<sup>8</sup>

O termostato geológico estava longe de ser perfeito e houve momentos em que ameaçou quebrar, o que teria consequências terríveis para a biosfera. Mas, por fim, surgiram outros termostatos de reserva, criados pelas atividades dos organismos vivos. Assim, devemos retornar agora ao papel da vida na biosfera à medida que os organismos vivos entraram no estágio geológico da Terra e começaram a explorar e, em seguida, transformar seus diversos recantos e refúgios ecológicos.

## A UNIDADE DA VIDA

Apesar das profundas diferenças entre o *Tyrannosaurus rex* e uma bactéria *E. coli*, em aspectos importantes, a vida é notavelmente unificada. Todos os organismos vivos hoje estão relacionados geneticamente. E eles compartilham muitos dispositivos genéticos, em particular aqueles que, como as sub-rotinas em software de computador, cuidam das tarefas básicas de limpeza. Nas células, essas tarefas incluem coisas como decompor moléculas alimentares para sua energia ou seus componentes químicos ou mover energia e átomos. É por isso que, se dermos um zoom até o nível das células, será difícil distinguir entre um ser humano e uma ameba.

Hoje, os biólogos podem rastrear as relações genéticas entre todos os organismos vivos comparando as enormes sequências de As, Cs, Gs e Ts em seu DNA. A regra básica é que, quanto mais divergência há entre dois genomas, mais tempo se passou desde que essas duas espécies compartilharam um ancestral comum, e sabemos mais ou menos a velocidade com que diferentes tipos de genomas se diversificam. Desse modo, podemos dizer com alguma confiança que seres humanos e chimpanzés compartilharam um ancestral comum há cerca de 7 milhões ou 8 milhões de anos, enquanto seres humanos e bananas seguem caminhos genéticos diferentes há cerca de 800 milhões de anos. A comparação do DNA de diferentes espécies vivas nos permite construir árvores genealógicas muito mais detalhadas e provavelmente mais precisas do que aquelas baseadas apenas no registro fóssil.

Atualmente, os biólogos classificam todos os organismos vivos em três grandes domínios: Archaea e Eubacteria, que consistem inteiramente de

procariontes unicelulares, e Eukarya, que consiste em organismos unicelulares mais complexos e também em organismos multicelulares como nós. O moderno sistema de classificação evoluiu do trabalho taxonômico (classificatório) do biólogo sueco Carl Nilsson Linnaeus (Lineu), no século XVIII. Ele agrupou todos os organismos em classes aninhadas. O menor nível taxonômico é a espécie e contém apenas um registro. O próximo nível é o gênero, um grupo de espécies intimamente relacionadas. Os seres humanos, por exemplo, pertencem ao gênero e à espécie *Homo sapiens*; o gênero *Homo* inclui nossos ancestrais agora extintos *Homo habilis* e *Homo erectus* (também conhecido como *Homo ergaster*). Os níveis taxonômicos tornam-se cada vez mais amplos a partir daí; em ordem crescente, denominam-se família, ordem, classe, filo, reino e domínio. Assim, podemos dizer que os seres humanos pertencem à espécie *sapiens*, ao gênero *Homo*, à família Hominidae, à ordem Primatas, à classe Mammalia, ao filo Chordata (vertebrados), ao reino Animalia e ao domínio Eukarya.

Os primeiros organismos vivos certamente se diversificaram rapidamente, à medida que entravam em novo território evolutivo. Muitos zumbis podem ter sobrevivido entre eles. Eis uma descrição do estranho mundo dos começos da vida feita em uma história recente da vida na Terra:

Podemos pensar em um zoológico gigante de vivos, quase vivos e os que estão evoluindo para a vida. O que esse zoológico conteria? Muitas criaturas de ácido nucleico de vários tipos, coisas que não existem mais e não têm nome por causa disso. Podemos imaginar combinações químicas complicadas. E todos esses enormes conjuntos de vivos e quase vivos teriam existido em um ecossistema florescente, bagunçado e competitivo — *a época da maior diversidade da vida na Terra*.<sup>9</sup>

Em algum momento no início do éon arqueano (que começou há 4 bilhões de anos), os mecanismos reprodutivos se tornaram mais precisos, os genes se tornaram mais estáveis e as fronteiras entre os vivos e os quase vivos ficaram mais claras. Esse é o ponto em que a seleção natural, no sentido de Darwin, realmente decolou. Depois que a vida começou, não havia garantias de que sobreviveria. Marte e Vênus podem ter abrigado formas de vida simples. Mas, se o fizeram, a vida logo se extinguiu em ambos os planetas. Até mesmo na Terra, a sobrevivência de uma escassa vida por quase 4 bilhões de anos dependeu de muitas coisas darem certo.

## PROCARIONTES: UM MUNDO DE ORGANISMOS UNICELULARES

Os primeiros organismos vivos provavelmente pertenciam ao domínio de Archaea, embora os organismos do segundo domínio, o Eubacteria, também tenham aparecido cedo. Ambos os domínios consistem inteiramente em procariontes, organismos unicelulares diminutos que não possuem um núcleo distinto nem outras organelas celulares especializadas. Os procariontes dominariam a biosfera por mais de sete oitavos de sua história, até cerca de 600 milhões de anos atrás. Se encontrarmos com organismos vivos em outras partes da nossa galáxia, provavelmente não apertaremos suas mãos, mas estaremos olhando para eles através de um microscópio.

São tão pequenos os procariontes que 100 mil deles poderiam fazer uma festa dentro do ponto-final desta frase. Os genes procariotas flutuam livremente em anéis e filamentos dentro do lodo molecular salgado de seu citoplasma, de modo que seu DNA é constantemente golpeado, como tudo o mais no citoplasma, e pode ser facilmente danificado ou alterado. Pedacos de material genético podem até flutuar através das membranas celulares e migrar para outras células. No mundo procariótico, muitas ideias genéticas se espalham para os lados, entre indivíduos não relacionados, bem como na vertical, de pais para filhos. Os procariontes trocam genes como nós, humanos, trocamos dinheiro, e é por isso que a ideia de uma espécie distinta é mais difícil de definir no mundo procariótico do que em nosso mundo.

Hoje, os procariontes ainda dominam a biosfera. Na superfície e dentro de nosso corpo, existem provavelmente mais células procarióticas do que células com nosso próprio DNA. Mas nós as ignoramos (até que

nos causem dor de estômago ou resfriado) porque são muito menores do que nossas próprias células. Esse vasto mundo que compartilhamos com os procariontes é conhecido como *microbioma*.

Até recentemente, era tentador pensar que a história dos organismos unicelulares era entediante e que poderíamos pular alegremente os primeiros 3 bilhões de anos da história da biosfera. Hoje, estamos aprendendo que não podemos entender a história recente da biosfera sem entender a era muito mais longa da vida pequena. À medida que evoluíam, os procariontes desenvolveram muitos truques novos que lhes permitiram explorar diferentes ambientes, e ainda usamos várias das técnicas bioquímicas que eles foram os primeiros a desenvolver.

Todos os procariontes podem processar informações. De certo modo, eles podem até aprender. Embutidos em suas membranas, há milhares de sensores moleculares que podem detectar gradientes de luz e acidez, perceber quando há alimentos ou venenos potenciais nas proximidades e dizer se esbarraram em algo duro. Os sensores são feitos de proteínas, que, como todas as enzimas, têm locais de ligação que se fixam em determinadas moléculas fora da célula ou reagem a mudanças de luz, acidez ou temperatura. Depois que essas proteínas detectam algo, sua forma muda ligeiramente, o que envia um sinal para o interior da célula. A muito estudada bactéria *E. coli*, por exemplo, tem quatro tipos diferentes de moléculas sensórias incorporadas em suas membranas e, juntas, elas podem detectar cerca de cinquenta tipos diferentes de coisas boas ou ruins nas vizinhanças.<sup>10</sup> Quando os sensores detectaram algo, a célula pode fazer escolhas. Por exemplo, pode decidir deixar moléculas específicas entrar através das paredes de sua membrana (porque se parecem com comida) ou impedi-las de entrar (porque parecem veneno). A tomada de decisão pode ser muito simples. Pode basear-se

num pequeno número de inputs e requer somente respostas sim ou não. “Devo deixar essa molécula entrar ou não?” Ou: “Está ficando muito quente deste lado, poxa! Devo me mudar?”. Mas até mesmo os sensores mais simples estão, na verdade, criando esboços básicos do ambiente de uma célula. Uma vez tomada a decisão de mover-se, qualquer equipamento que a célula tenha para controlar o movimento será ativado. Para muitas bactérias, trata-se de uma espécie de tentáculo rotativo, ou flagelo, que pode agir como uma hélice. A *E. coli* possui seis desses apêndices parecidos com chicotes incorporados em suas membranas. Cada um deles é constituído por vinte componentes diferentes e pode girar várias centenas de vezes por segundo, alimentado por energia dos gradientes de prótons através de suas membranas. Quando necessário, os flagelos podem girar juntos para dar um movimento mais direcionado.<sup>11</sup> O elo entre os sensores na membrana e os flagelos significa que, com efeito, a *E. coli* tem uma memória de curto prazo. Ela pode durar apenas alguns segundos, mas é poderosa o suficiente para dizer: “Sem problemas, nada a fazer!”. Ou: “Isso não é bom, flagelos, *comecem a se debater!*”. A memória de curto prazo baseia-se em pequenas alterações nos sensores e nas substâncias químicas que eles emitem.

Trata-se de um equipamento simples de processamento de informações, mas já temos os três principais componentes de todo o processamento de informações biológicas: entradas, processamento e saídas.

O gerenciamento da informação deu aos procariontes mais controle sobre os fluxos locais de energia. Com o tempo, os procariontes evoluíram para obter, controlar e gerenciar energia em muitos dos diversos ambientes dos oceanos da Terra. Os primeiros procariontes

foram provavelmente quimiotróficos. Isso significa que obtinham energia de reações geoquímicas entre a água e as rochas que liberavam substâncias simples, como sulfeto de hidrogênio e metano, energia química que podiam acessar.<sup>12</sup> Mas nos primeiros oceanos havia um suprimento limitado de substâncias químicas facilmente digeríveis que pudessem liberar energia em conta-gotas; esse tipo de substância só estava prontamente disponível em ambientes raros, como as fontes suboceânicas. Esses limites teriam restringido as possibilidades de vida na Terra. Muito cedo, alguns procariontes aprenderam a comer outros procariontes. Foram os primeiros heterótrofos da biosfera, o equivalente procariótico de carnívoros como o *T. rex*. Você e eu também somos heterotróficos; obtemos nossa energia alimentar consumindo outros organismos, e não de produtos químicos. Mas mesmo a ingestão de outros organismos tem seus limites se toda a biosfera depender de uma cadeia energética ancorada no interior dos oceanos.

## FOTOSSÍNTESE: UMA BONANÇA ENERGÉTICA E UMA REVOLUÇÃO

Há cerca de 3,5 bilhões de anos, uma inovação evolucionária, a fotossíntese, permitiu que alguns organismos captassem fluxos de energia do Sol. Foi o primeiro período de bonança energética da vida, e seu impacto foi o equivalente procariótico de achar um veio de ouro.

Os fótons de luz do Sol têm milhares de vezes mais energia do que os velhos fótons cansados da radiação cósmica de fundo. O aproveitamento desse fluxo colossal de energia foi um divisor de águas. A partir de então, embora a vida continuasse a reciclar toda a matéria usada (daí o interesse dos cientistas pelos fluxos de carbono, nitrogênio e fósforo), a energia parecia ser mais ou menos ilimitada.<sup>13</sup> As células vivas passaram a ter a energia para reorganizar a si mesmas e seus arredores numa escala inteiramente nova. Elas se espalharam mais amplamente e a quantidade de vida certamente aumentou em várias ordens de grandeza.

Como os organismos vivos usaram a luz solar? Existem vários tipos de reações fotossintéticas que convertem a luz solar em energia biológica com diferentes graus de eficiência e liberam diferentes subprodutos. Todos eles usam fótons energéticos recém-chegados do Sol para injetar elétrons em moléculas sensíveis à luz, como a clorofila. Isso dá aos elétrons um choque tão grande que saltam de seus átomos e depois são sequestrados, se contorcendo o tempo todo, por proteínas. As proteínas passam os elétrons de alta energia através das membranas celulares, numa espécie de cadeia humana. Isso cria um gradiente elétrico através da membrana que pode ser usado para carregar moléculas transportadoras de energia, como o ATP. Isso é quimiosmose novamente,

porém dessa vez a energia que carrega as moléculas de ATP não vem das moléculas alimentares, mas daquele vasto gerador que está no céu, o Sol.

Esse é o primeiro estágio em todas as formas de fotossíntese. No segundo estágio, a energia captada é usada, numa série de reações químicas complexas que variam muito em sua eficiência, para fazer trabalhos dentro da célula ou para formar moléculas como os carboidratos, que podem armazenar energia para uso futuro. As primeiras formas de fotossíntese não tinham o oxigênio como subproduto e funcionavam bem em um mundo sem oxigênio livre. Elas talvez usassem energia capturada da luz do Sol para roubar elétrons do sulfeto de hidrogênio (o gás sulfídrico, que tem cheiro de ovo podre) ou de átomos de ferro dissolvidos nos primeiros oceanos.

Até mesmo as primeiras formas mais simples de fotossíntese forneciam um novo suprimento revolucionário de energia, e a quantidade de vida nos primeiros oceanos pode ter aumentado para até 10% dos níveis de hoje.<sup>14</sup> Os procariontes que sobreviviam à base da fotossíntese tinham de estar perto da superfície dos oceanos ou nos litorais. Muitos formaram estruturas semelhantes a corais conhecidas como estromatólitos, que se transformavam em recifes nas bordas dos continentes à medida que bilhões de organismos se acumulavam sobre camadas espessas de seus ancestrais mortos. Os estromatólitos ainda existem em alguns ambientes especiais, como a baía Shark, na costa oeste da Austrália. Eles são raros hoje em dia, mas desde a época em que surgiram, há mais de 3,5 bilhões de anos, até cerca de 500 milhões de anos atrás — mais da metade da história de nosso planeta — foram a forma mais visível de vida na Terra. Se alienígenas tivessem vindo em busca de vida no nosso planeta, teriam encontrado os estromatólitos. E

talvez seja isso que encontraremos quando detectarmos vida em planetas rochosos de outros sistemas estelares.

Novas formas de fotossíntese acabaram por se desenvolver em um grupo de organismos conhecidos como cianobactérias. Essas formas de fotossíntese poderiam extrair mais energia usando água e dióxido de carbono como suas principais matérias-primas. Arrancar elétrons de moléculas de água era mais difícil do que capturá-los de sulfeto de hidrogênio ou ferro. Mas, se fosse possível fazer isso, se obteria mais energia e é evidente que, na água, havia uma fonte de energia muito mais abundante. Usando a energia captada da luz solar, esses fotossintetizadores sofisticados atacaram moléculas de água e removeram elétrons de seus átomos de hidrogênio. Em seguida, adicionaram os elétrons capturados de moléculas de dióxido de carbono para formar moléculas de carboidratos, que funcionavam como enormes celeiros de energia. O oxigênio das moléculas de água rompidas era liberado como resíduo. A fórmula geral para essa forma de fotossíntese geradora de oxigênio é  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{energia da luz solar} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}$  (carboidratos que funcionam como reservas de energia) +  $\text{O}_2$  (moléculas de oxigênio liberadas na atmosfera). A fotossíntese do oxigênio era muito mais eficiente do que as formas anteriores, mas ainda assim conseguia extrair apenas cerca de 5% da energia da luz solar, menos do que os painéis solares modernos mais eficientes. A fotossíntese paga uma taxa de lixo substancial à entropia na energia desperdiçada dentro da célula e na energia e nos materiais levados pelo oxigênio.

A fotossíntese produtora de oxigênio, o tipo de fotossíntese usado por todas as cianobactérias modernas, pode ter evoluído a partir de 3 bilhões de anos atrás. Isso é sugerido por indícios de breves “traços” de aumento nos níveis de oxigênio, mesmo antes do final do éon arqueano, há 2,5

bilhões de anos. Mas, de início, qualquer oxigênio liberado teria sido rapidamente absorvido pelo ferro, pelo sulfeto de hidrogênio ou por átomos de hidrogênio livres, porque o oxigênio é um ladrão de elétrons e se combinará avidamente com qualquer elemento que tenha elétrons sobressalentes. É por isso que se diz que os átomos que tiveram seus elétrons roubados foram oxidados. (Dos átomos com elétrons sobressalentes diz-se que foram reduzidos, e as muitas reações químicas que envolvem ambos os processos são conhecidas como reações redox — de redução-oxidação.) Um indício poderoso da evolução das primeiras cianobactérias é o desaparecimento, há 3 bilhões de anos, de rochas sedimentares ricas em pirita (ouro de tolo) que, como o ferro, enferruja na presença de oxigênio livre. Mas havia um limite para a quantidade de oxigênio que esses mecanismos poderiam absorver e, a partir de mais ou menos 2,4 bilhões de anos atrás, os níveis do oxigênio atmosférico começaram a aumentar rapidamente, de menos de 0,001% do nível atual para talvez 1% ou mais.

O aparecimento de uma atmosfera rica em oxigênio a partir de 2,5 bilhões de anos atrás (o “grande evento de oxigenação”) transformou a biosfera. O aumento dos níveis de oxigênio alterou a química da biosfera e até mesmo dos níveis superiores da crosta terrestre. A energia química excepcional de oxigênio livre impulsionou novas reações químicas que criaram muitos dos minerais existentes na Terra de hoje.<sup>15</sup> No alto da atmosfera, os átomos de oxigênio se combinaram para formar moléculas de ozônio (O<sub>3</sub>) de três átomos, que começaram a proteger a superfície da Terra da perigosa radiação ultravioleta solar e continuaram a fazê-lo desde então. Protegidas pela camada de ozônio, algumas algas podem ter começado a colonizar a terra pela primeira vez. Até então, banhados numa radiação solar que teria destruído qualquer bactéria

suficientemente corajosa para se aventurar em terra, os continentes do planeta Terra tinham sido mais ou menos estéreis.

O acúmulo de oxigênio foi um choque profundo para organismos vivos porque, para a maioria deles, esse elemento era venenoso. Assim, o aumento de seu nível causou o que a bióloga Lynn Margulis chamou de “holocausto do oxigênio”. Muitos organismos procarióticos pereceram, e aqueles que não morreram recuaram para ambientes protegidos nos níveis mais profundos e pobres em oxigênio dos oceanos ou mesmo dentro de rochas.

O aumento dos níveis de oxigênio bagunçou os termostatos da Terra porque, até então, não havia mecanismos que pudessem absorver o excesso de oxigênio e seu acúmulo ameaçava fugir do controle. O oxigênio livre decompôs o metano atmosférico, um dos mais poderosos gases do efeito estufa, enquanto a fotossíntese das cianobactérias consumia enormes quantidades do outro gás crucial do efeito estufa, o dióxido de carbono. Quando os níveis de oxigênio aumentaram e os níveis de gases do efeito estufa caíram, no início do éon proterozoico, a Terra congelou no primeiro de vários episódios de bola de neve terrestre. As geleiras se espalharam dos polos para o equador, vestindo o planeta de branco, e a Terra branca refletiu mais luz do Sol, resfriando-a ainda mais num ciclo aterrorizante de feedback positivo. Por fim, a maior parte dos oceanos e continentes da Terra ficou coberta de gelo. A glaciação de Makganyene durou 100 milhões de anos, de cerca de 2,35 bilhões a 2,22 bilhões de anos atrás.

A coisa ficou por um triz. Organismos para os quais o oxigênio era um veneno pereceram ou se esconderam na profundidade dos oceanos. Mas mesmo organismos que poderiam lidar com o oxigênio sofreram num mundo em que geleiras cobriam a terra e os oceanos, bloqueando a luz

solar necessária para a fotossíntese. A vida ficou pendurada por um fio, enquanto a maioria das formas de vida recuava sob o gelo e se amontoava ao redor das fogueiras quentes dos vulcões suboceânicos.

Mas a Terra não seguiu o exemplo de Marte e ficou fria demais para a vida, graças ao termostato geológico impulsionado pela tectônica das placas, então renovado e suplementado por novas técnicas biológicas que dependiam da atividade de fotossíntese dos organismos. As geleiras bloquearam a fotossíntese, o que reduziu a produção de oxigênio. Enquanto isso, sob as geleiras, os vulcões oceânicos continuaram a bombear dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa de volta aos oceanos. Os gases de efeito estufa começaram a se acumular sob o gelo até que, finalmente, romperam as geleiras e a superfície da Terra se aqueceu novamente. Os níveis de oxigênio caíram para 1% ou 2% da atmosfera, e seguiu-se um longo período, de quase 1 bilhão de anos, durante o qual os níveis de oxigênio permaneceram baixos e os climas permaneceram quentes. Os antigos termostatos da Terra pareciam ter sido restaurados para lidar com a presença de níveis significativos de oxigênio atmosférico produzido por cianobactérias.

## A SALVAÇÃO PELOS EUCARIONTES

Seria uma solução de longo prazo? Esses mecanismos não prometiam uma biosfera que flutuaria perigosamente entre o calor extremo e o frio extremo? Se assim era, por que os climas ficaram relativamente estáveis por 1 bilhão de anos, entre cerca de 2 bilhões e 1 bilhão de anos atrás? Dessa vez, a biologia veio em socorro ao desenvolver novos tipos de organismos que poderiam suplementar os termostatos da Terra sugando oxigênio do ar. Esses organismos, as primeiras células eucarióticas, não só ajudaram a estabilizar as temperaturas globais, como também marcaram uma revolução biológica que eventualmente permitiria a evolução de grandes organismos como você e eu.

Até então, todos os organismos vivos tinham sido procariontes unicelulares no domínio de Archaea ou Eubacteria. O surgimento de um terceiro domínio de formas de vida, Eukarya, é muito importante para nós, porque todos os grandes organismos, inclusive os seres humanos, são construídos a partir de células eucarióticas. Trata-se das primeiras células que puderam usar o sistema do oxigênio de forma sistemática, explorando sua feroz energia química num processo conhecido como respiração, que é o que estamos acostumados a fazer. A respiração é o reverso da fotossíntese e é, na verdade, uma forma de liberar a energia solar que foi captada e armazenada dentro das células através da fotossíntese. Enquanto a fotossíntese usa a energia da luz solar para transformar dióxido de carbono e água em carboidratos que armazenam energia, deixando o oxigênio como resíduo, a respiração usa a energia química do oxigênio para roubar a energia armazenada nos carboidratos,

deixando dióxido de carbono e água como resíduos. A fórmula geral da respiração é  $\text{CH}_2\text{O}$  (carboidratos) +  $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{energia}$ .

Tal como a fotossíntese, a evolução da respiração pelos eucariotas (ou eucariontes) conta como um período de bonança energética, porque deu a esses novos organismos acesso às enormes energias químicas do oxigênio, mas em doses minúsculas e suaves que não os explodiram. A respiração nos dá a energia do fogo sem sua destrutividade. Ao usar o oxigênio de maneira inteligente, a respiração pode extrair pelo menos dez vezes mais energia de moléculas orgânicas do que formas anteriores não oxigenadas de decompor moléculas alimentares.<sup>16</sup> Com mais energia para alimentar seu metabolismo, as taxas de produção primária — a produção de organismos vivos — pode ter aumentado de dez a mil vezes.<sup>17</sup>

Indícios genéticos sugerem que os primeiros eucariotas surgiram há cerca de 1,8 bilhão de anos.<sup>18</sup> À medida que proliferavam, absorvendo cada vez mais oxigênio, bombeavam dióxido de carbono de volta para a atmosfera como um resíduo. E nisso vemos o começo de um novo termostato planetário biologicamente controlado. Os eucariotas começaram a remover grande parte do oxigênio atmosférico gerado pelas cianobactérias. Isso pode ajudar a explicar por que os climas foram relativamente estáveis durante grande parte do éon proterozoico. Com efeito, eles eram tão estáveis que alguns paleontólogos chamam o período entre 2 bilhões e 1 bilhão de anos atrás de “o bilhão entediante”.

Os biólogos modernos consideram a distinção entre células eucarióticas e procarióticas uma das divisões mais fundamentais da biologia. As células eucarióticas são muito maiores do que a maioria das células procarióticas. Elas podem ser dez ou cem vezes mais largas, de modo que seu volume total pode ser milhares de vezes maior. Nos

eucariotas, as membranas se formam dentro das células, bem como em torno delas, criando compartimentos separados, como os cômodos de uma casa, nos quais diferentes atividades podem ocorrer. Isso abre espaço para a especialização, uma divisão interna do trabalho que era impossível para os procariontes. Um desses compartimentos, o núcleo, protege o material genético de todos os eucariotas. Com efeito, a palavra “eucariota” (ou “eucarionte”) vem do grego *eukaryon*, que significa noz ou núcleo perfeito. O recipiente protegido do núcleo assegurou que o DNA eucariótico fosse geralmente mais estável que o dos procariontes. Ele também podia ser armazenado em grandes quantidades e copiado com mais facilidade, de modo que eucariotas têm geralmente mais brinquedos genéticos para brincar. E isso explica por que eles acabaram evoluindo de maneira ainda mais exuberante que os procariontes. Os eucariotas também contêm muitas organelas internas, como versões reduzidas do coração, fígado e cérebro dos animais. As mais importantes são as mitocôndrias, que alguns eucariotas usam para obter a rica energia do oxigênio, e os cloroplastos, que outros eucariotas usam para obter energia da luz solar através da fotossíntese.

Os eucariotas também tinham novas capacidades de processamento de informação e controle do corpo, o que significava que podiam reagir de maneiras mais complexas a mudanças em seu entorno.<sup>19</sup> O eucariota unicelular paramécio tem um truque perfeito para lidar com obstáculos. Se ele bate em um, recua, vira alguns graus e avança novamente, repetindo o movimento para a frente e para trás, como um motorista ruim tentando estacionar, até que não bate em mais nada. Na verdade, ele está mapeando seu ambiente e aprendendo o que fazer a seguir. Ele usa as informações sobre seus arredores para se orientar no mundo, para evitar perigos e para encontrar energia e comida.

Como as primeiras células eucarióticas evoluíram? A bióloga Lynn Margulis mostrou que elas não evoluíram por meio da competição, mas por uma espécie de fusão de duas espécies procarióticas existentes. É comum que diferentes espécies colaborem através do que é conhecido como simbiose. Hoje, os seres humanos têm relações simbióticas vitais com trigo, arroz, gado, ovelhas e muitas outras espécies. Mas Margulis estava falando de um tipo muito mais radical de simbiose, no qual bactérias independentes, inclusive os ancestrais das mitocôndrias modernas, acabavam vivendo dentro de uma célula do Archaea. Margulis chamou o mecanismo de *endossimbiose*. No começo, sua ideia parecia maluca, porque ia contra alguns dos conceitos mais fundamentais da evolução por seleção natural. Mas, hoje, a maioria dos biólogos aceita seus argumentos.

A evidência mais importante da endossimbiose é o estranho fato de que algumas das organelas dentro dos eucariotas contêm seu próprio DNA, e esse DNA é bem diferente do material genético do núcleo. Margulis percebeu que organelas como as mitocôndrias, que gerenciam a energia em animais, e os cloroplastos, que controlam a fotossíntese em plantas eucarióticas, *parecem* ser células procariotas outrora independentes. Exatamente como elas acabaram dentro de outras células ainda não está claro, e alguns sustentaram que tais fusões devem ser extremamente raras. Se assim for, isso provavelmente significa que, mesmo que organismos semelhantes a bactérias sejam comuns no universo, organismos grandes como os seres humanos podem ser extremamente raros, porque, pelo menos em nosso planeta, apenas eucariotas podem construir organismos grandes.

A descoberta da endossimbiose de Margulis nos diz alguma coisa a mais sobre a história da vida. A evolução não é apenas uma questão de

competição. Nem é apenas uma questão de divergência constante à medida que novas espécies aparecem. Vemos também colaboração, simbiose e até convergência. Isso significa que temos que reconsiderar a metáfora convencional de uma árvore da vida, porque, mesmo que ainda pensemos em três domínios da vida, parece que o terceiro domínio, o Eukarya, evoluiu não por divergência crescente, mas pela convergência de Archaea e Eubacteria — como se dois ramos de uma árvore antiga se juntassem novamente.

Como se isso não fosse suficientemente estranho, os eucariontes tinham mais um truque na manga: o sexo. Como todas as espécies, eles passam seus genes para seus descendentes. A maioria simplesmente se divide em dois e passa adiante seus genes através da reprodução assexuada. Mas, como vimos, os genes procariotas também podem viajar para os lados, à medida que pedaços de DNA e RNA abandonam o barco, vão para a estrada e encontram novos lares dentro de outras células. As células procarióticas compartilham genes do mesmo modo que os seres humanos compartilham os livros de bibliotecas. Mas os eucariotas têm uma maneira diferente e mais complexa de transmitir seus genes, e os passam somente para seus descendentes, nunca para estranhos.

Nos eucariotas, o material genético é bloqueado dentro da caixa-forte protegida do núcleo. Esse material é liberado apenas sob as condições mais rigorosas, usando regras menos promíscuas e mais ordenadas do que as dos procariontes, e essas regras afetam o modo como as células eucarióticas evoluem. Quando eucariotas produzem células germinativas — óvulos e espermatozoides, as células das quais seus filhotes serão formados —, eles não se contentam em *simplesmente* copiar seu DNA. Eles misturam primeiro. Eles trocam parte de seu material genético com outro indivíduo de sua espécie, de modo que os descendentes dos dois

progenitores ganham uma seleção aleatória de genes, metade de um dos pais e metade do outro genitor. Tanto os mecanismos genéticos quanto os mecanismos físicos envolvidos nessa elaborada dança são refinadamente complexos. Mas o resultado foi acrescentar uma nova reviravolta à evolução. Garantiam-se variações genéticas leves, mas aleatórias, a cada geração, porque, ainda que a maioria dos genes fosse igual (afinal, ambos os genitores são da mesma espécie), um número minúsculo sempre era um pouco diferente. Com mais variações para selecionar, a evolução tinha mais opções. É por isso que a evolução parece ter se acelerado nos últimos bilhões de anos. O entediante bilhão de anos do éon proterozoico preparou o caminho para uma época muito mais excitante — o éon fanerozoico, a era da vida grande.

## 6. A vida grande e a biosfera

*Os animais podem ser a cobertura da evolução, mas as bactérias são o bolo.*

Andrew Knoll, *A vida em um jovem planeta*

## VIDA GRANDE

A vida pequena dominou a biosfera por 3,5 bilhões de anos e ainda domina grande parte dela. Demorou 3 bilhões de anos para ir de Luca aos primeiros espécimes de vida grande — os primeiros animais multicelulares, ou metazoários. Isso nos diz que desenvolver organismos multicelulares foi muito mais complicado do que fazer evoluir os procariontes. E sugere que, se há muita vida no universo, os metazoários devem ser raros. Os metazoários representam um novo nível e tipo de complexidade entre os organismos vivos.

Muitos mecanismos moleculares tinham de estar em vigor antes que se pudesse pensar em construir organismos multicelulares. Precisava-se de maneiras confiáveis de unir milhões de células em estruturas exatas; precisava-se de novos canais de comunicação entre células, novas maneiras de treinar células para papéis específicos, novas formas de gerenciar e compartilhar informações e energia entre bilhões de células. E era necessário um maquinário que pudesse construir asas, olhos, garras, corações, antenas, tentáculos, nadadeiras, conchas, esqueletos e — uma vez que organismos grandes captavam, processavam e reagiam a muito mais informações — cérebros. Isso é um monte de infraestrutura nova.

Demorou para que essa maquinaria evoluísse e, então, para construir metazoários, o planeta Terra precisava de mais uma condição Cachinhos Dourados: estabilidade. Condições propícias à vida não são suficientes. É preciso que essas condições persistam por um longo tempo para que a vida possa continuar a evoluir e experimentar. Um sol estável ajuda nisso, e o nosso se encaixa perfeitamente no perfil. Por padrões estelares,

trata-se de um cidadão confiável e é improvável que faça alguma coisa muito imprevisível. Órbitas erráticas significam mudanças climáticas selvagens, portanto órbitas planetárias estáveis ajudam. Nossa Terra também cumpre esse requisito. Nossa Lua extraordinariamente grande ajudou a estabilizar a órbita e a inclinação da Terra. E, como vimos, as placas tectônicas, a erosão e depois a própria vida forneceram termostatos que impediram que as temperaturas oscilassem demais na superfície da Terra.

Muita coisa poderia ter dado errado. Uma supernova de um sistema estelar vizinho poderia ter explodido. Poderíamos ter colidido fatalmente com outro planeta. De algum modo, nossa Terra evitou esses perigos e permaneceu propícia à vida por mais de 3 bilhões de anos. Isso foi tempo suficiente para a vida grande evoluir. E a vida grande é realmente grande. Somos para as bactérias o que o arranha-céu Burj Khalifa, em Dubai, de 830 metros e 160 andares, é para uma formiga que passa ao lado dos sapatos do porteiro.

Depois de aparecer, a vida grande transformaria a biosfera tanto quanto a vida pequena fez, mas de novas maneiras. Os metazoários colonizaram os continentes e os transformaram. As plantas grandes trituraram rochas e fizeram delas solo, aceleraram a erosão e transformaram as superfícies rochosas e poeirentas da Terra primitiva, com seus litorais cercados de estromatólitos, nos exuberantes e exóticos jardins, florestas e savanas do último meio bilhão de anos. Enquanto bombeavam oxigênio no ar, as plantas verdes terrestres transformavam a atmosfera. A partir de cerca de 400 milhões de anos atrás, a Terra se acostumou a uma nova norma atmosférica de altos níveis de oxigênio (acima de 15% da atmosfera, ao contrário da norma anterior de menos de 5%) e baixos níveis de dióxido de carbono (algumas centenas de

partes por milhão, ao contrário de alguns milhares de partes por milhão). Os animais vagavam pelos novos nichos criados pelas grandes plantas, e fungos e bactérias limpavam, decompunham e reciclavam os restos dos mortos. Os metazoários também transformaram os oceanos, enchendo-os de novas criaturas estranhas, de camarões a cavalos-marinhos, de polvos a baleias-azuis.

## OS DISPOSITIVOS MOLECULARES QUE POSSIBILITARAM A VIDA GRANDE

Nos últimos bilhões de anos, as inovações celulares mais importantes não estiveram *nas* células (os procariontes fizeram a maior parte do trabalho dentro delas), mas nas relações arquitetônicas mutáveis *entre* as células. Os primeiros organismos multicelulares eram feitos de células que se ligavam fracamente, como os bilhões de células de um estromatólito. Eles eram, na verdade, rebanhos, em vez de organismos. Com efeito, muitas bactérias mostram comportamento semelhante ao de um rebanho, o que implica algum tipo de sistema de comunicação rudimentar. Na prática, isso significa que as redes computacionais dentro de cada célula estão conectadas a um sistema computacional composto de muitas células distintas.

Alguns dos primeiros metazoários podem ter sido metazoários em tempo parcial, como os modernos fungos. O *Dictyostelium* é uma ameba. Na maioria das vezes, suas células levam vidas independentes. Mas, quando a comida é escassa, milhares de células se juntam para formar uma lesma, uma entidade maior que pode se mover em busca de alimento. E a lesma pode fazer coisas que os indivíduos não podem, como avançar grandes distâncias em direção ao calor e à luz. À medida que a lesma se desloca, as células individuais podem mudar e assumir papéis diferentes, algumas como esporos, outras como parte do caule ou do pé. O *Dictyostelium* nos conta várias coisas importantes. Primeiro, a multicelularidade evoluiu muitas vezes e ainda está evoluindo hoje em alguns grupos de organismos. Segundo, a multicelularidade, como a vida, tem uma zona-limite cinzenta de organismos que são difíceis de classificar.<sup>1</sup> Em terceiro lugar, a multicelularidade multiplica o poder

computacional das células individuais, aumentando sua capacidade de gerenciar informações a respeito de seus ambientes.

Em organismos totalmente multicelulares, cada célula é tão especializada e tão interdependente que não consegue sobreviver sozinha. A multicelularidade genuína é realmente uma forma extrema de simbiose. Mas a colaboração é facilitada pelo fato de que a maioria das células nos metazoários é geneticamente idêntica. Constituem uma família. Assim, cada célula trabalha para sustentar todo o organismo, às vezes sacrificando sua própria vida pelo bem do resto. Com efeito, as células, como os pilotos kamikazes, muitas vezes se autodestroem quando não estão mais funcionando bem ou não são mais necessárias, processo conhecido pelos biólogos como *apoptose*. Em um único dia, até 50 bilhões de células de nosso corpo cometem suicídio por apoptose.

O intercâmbio de informações é tão crucial para os organismos multicelulares quanto para as sociedades modernas. Grande parte da comunicação intercelular é realizada pelo equivalente celular de um serviço postal; moléculas mensageiras espremem-se através das membranas de cada célula e circulam entre as células carregando nutrição, avisos, informações e ordens. O quanto do genoma do metazoário é dedicado à colaboração tornou-se claro quando o primeiro deles foi sequenciado, em 1998. O organismo era um verme, o *Caenorhabditis elegans*, que tem um sistema nervoso com exatamente 302 neurônios. Acontece que cerca de 90% de seus 18891 genes não estão presentes em procariontes unicelulares, porque o trabalho desses genes é ajudar as células a trabalharem juntas.<sup>2</sup>

As células de um organismo grande funcionam bem juntas porque compartilham os mesmos genes, mas desempenham papéis diferentes porque genes diferentes são ativados em células diferentes. À medida que

a célula única de um óvulo fertilizado se divide e se multiplica, novas células ativam partes diferentes de seu genoma compartilhado, dependendo de onde elas se encontram no embrião em evolução. Vários genes determinam quais estruturas possuem e que papéis desempenharão dentro do organismo. Na administração desse notável processo de desenvolvimento há um pequeno grupo de genes conhecidos como genes *toolkit* (ferramentais), como os cerca de duzentos genes *Hox*.<sup>3</sup> Esses genes são como gerentes de construção. Enquanto os genes comuns fazem trabalhos de construção comuns, formando esta proteína ou ativando aquela enzima, os genes ferramentais decidem quando e onde os trabalhadores moleculares específicos irão, usando planos arquitetônicos armazenados no DNA da célula. Eles podem dizer: “Tudo bem, venha cá, você precisa começar a brotar uma perna”, ou “Não, você é uma célula óssea, não um neurônio”. É assim que as células musculares são criadas, bem como as células nervosas, da pele, dos ossos e todos os duzentos diferentes tipos diferentes de células que compõem um corpo humano.

Os genes ferramentais são notavelmente similares em diferentes espécies, o que sugere que fazem parte dos primeiros dispositivos da vida grande. Não são eles que diferenciam as baratas das cacatuas, mas sim variações no modo como funcionam no trabalho de ativação dos genes. Dessa maneira, o que é uma perna em uma espécie pode aparecer como uma asa em outra espécie, e o que começou parecido com um girino pode acabar como uma baleia-azul. Se os genes ferramentais ativarem os genes na ordem errada, o resultado pode ser monstruoso, como moscas de frutas com pernas crescendo de sua testa. Os diferentes planos arquitetônicos usados por esses genes ajudam a explicar a notável variedade de organismos metazoários atuais.

## A VIDA GRANDE DECOLA: OS PERÍODOS EDIACARANO E CAMBRIANO

Os metazoários não floresceram antes de cerca de 1 bilhão de anos atrás. Os primeiros foram, provavelmente, algas fotossintetizadoras que formaram estruturas parecidas com algas marinhas. Mas no final do éon proterozoico, há cerca de 600 milhões de anos, a vida grande decolou quando milhões de espécies de metazoários começaram a explorar os muitos nichos novos e canais de vida abertos pela multicelularidade.

A ascensão da vida grande foi impulsionada por oscilações climáticas extremas no final do período proterozoico. Houve provavelmente mais dois episódios de bola de neve terrestre, provocados pelo aumento dos níveis de oxigênio. Tão significativo foi o período de frio que começou há cerca de 700 milhões de anos que, em 1990, os geólogos acrescentaram um novo período à linha do tempo geológica: o período criogeniano, que começou há cerca de 720 milhões de anos e durou 85 milhões de anos. Geleiras de quilômetros de profundidade se espalham pela terra e pelos oceanos; as temperaturas da superfície podem ter caído para cinquenta graus Celsius negativos e a fotossíntese teria sido em grande parte impedida. Mais uma vez, o destino de todos os organismos vivos ficou por um fio.

Por que a Terra congelou? Algas que se espalham pelo solo podem ter atraído muito dióxido de carbono,<sup>4</sup> mas a mudança de configuração dos continentes também pode ter desempenhado um papel importante. Desde o início do éon proterozoico, as placas tectônicas se reuniam periodicamente em enormes supercontinentes. O supercontinente de Columbia atingiu seu maior tamanho há cerca de 1,8 bilhão de anos.<sup>5</sup> Há 1 bilhão de anos, a maioria dos continentes se uniu em outro

supercontinente conhecido hoje como Rodínia. O rompimento de Rodínia criou uma geografia global mais complexa e acelerou a desagregação, que teria atraído muito mais dióxido de carbono. Talvez tenha havido processos ainda mais violentos em ação. Uma possibilidade é uma súbita mudança no eixo de rotação da Terra, que teria alterado a posição de todos os continentes em relação aos polos. Tais eventos são conhecidos como *deriva polar verdadeira*, e eles aconteceram pelo menos trinta vezes nos últimos 3 bilhões de anos. Um soluço geológico nessa escala poderia ter sido causado pelo súbito movimento de enormes massas de magma derretido dentro da Terra, ou talvez pelo impacto de um asteroide.<sup>6</sup>

Seja qual for a causa, essas mudanças violentas teriam forçado o ritmo evolutivo da vida. Sob o gelo, os organismos sobreviventes mais uma vez se amontoaram em torno de rachaduras na crosta terrestre que vazavam magma quente. Nesses campos de refugiados biológicos, a evolução poderia explorar caminhos estranhos, porque novos genes podem se espalhar rapidamente em populações pequenas e isoladas. Com efeito, esses mundos estranhos podem ter testemunhado alguns dos primeiros experimentos em multicelularidade.

O frio extremo terminou há cerca de 635 milhões de anos, e terminou de repente. Gases de efeito estufa de vulcões se acumularam sob o gelo e depois foram liberados explosivamente na atmosfera. Os níveis de dióxido de carbono dispararam, enquanto os níveis de oxigênio caíram para bem abaixo dos níveis atuais. As temperaturas aumentaram, o gelo derreteu e a biosfera transformou-se. Então, as novidades biológicas que tornaram possível a vida multicelular, muitas das quais eclodiram no frio e obscuro mundo do período criogeniano, foram liberadas num mundo em aquecimento.

Temos a primeira boa prova da existência de um grande número de organismos multicelulares no início do período ediacarano, que durou de aproximadamente 635 milhões de anos a cerca de 540 milhões de anos atrás. Pela primeira vez, vemos os três grupos familiares de organismos de grande porte: plantas, que dependem da fotossíntese e costumam ficar paradas e sugar a luz do Sol; fungos, que recolhem material orgânico em decomposição; e animais, que devem ser alertas e móveis porque sobrevivem caçando e comendo outros organismos. Com o surgimento de um grande número de organismos que obtinham sua energia através do consumo de outros organismos, a biosfera tornou-se mais complexa, mais diversificada e mais hierárquica, à medida que a energia da luz solar passava por diferentes níveis tróficos, de plantas a animais e fungos. Os animais, como os seres humanos, obtêm energia de segunda mão. Usamos energia que foi captada pela primeira vez pelas plantas e, quando chega até nós, boa parte já vazou. Os ecologistas falam de uma cadeia alimentar, uma espécie de fila de consumidores de energia em que as plantas estão na frente, seguidas por herbívoros (ou criaturas que consomem plantas), depois por carnívoros, que podem consumir herbívoros, e finalmente por fungos, que surgem na retaguarda e se banqueteam com os mortos. Todo o processo encanta a entropia, que exige um imposto sobre o lixo a cada passo. Aproximadamente 90% da energia captada pela fotossíntese é perdida a cada nível trófico e, portanto, há muito menos energia disponível para os elos posteriores na cadeia alimentar. É por isso que encontramos menos animais do que plantas na Terra e menos carnívoros do que herbívoros. Mas os fungos se dão bem de qualquer maneira, já que reciclam cadáveres.

Os primeiros organismos multicelulares eram provavelmente plantas, porque tinham cloroplastos dentro de suas células, para que pudessem

fazer fotossíntese. Os animais multicelulares evoluíram mais tarde, porque viviam mais acima na cadeia alimentar, onde a energia era mais escassa e precisavam de mais energia para caçar sua comida. O indício mais antigo de *animais* multicelulares vem dos oceanos do período ediacarano.

O nome do período vem dos montes Ediacara, no sul da Austrália, onde os primeiros fósseis desse período foram descobertos, na década de 1940. Paleontólogos encontraram pelo menos cem gêneros ediacaranos diferentes. A descoberta foi uma surpresa porque, por mais de um século, os biólogos supunham que os primeiros organismos grandes haviam surgido no período cambriano, entre 540 milhões e 490 milhões de anos atrás. Os biólogos não se deram conta das criaturas ediacaranas porque a maioria era de corpo mole, como esponjas, águas-vivas ou anêmonas-do-mar modernas, de modo que não fossilizavam bem. Hoje, os conhecemos graças principalmente aos rastros e túneis que deixaram para trás enquanto se arrastavam, escorregavam e se enterravam na lama dos mares ediacaranos. Os primeiros cnidários e ctenóforos (pense nas águas-vivas, embora isso não seja tudo que esses grupos incluam) provavelmente cruzaram os oceanos ediacaranos. Eles são importantes para nós porque são os primeiros organismos grandes com células nervosas, embora estas ainda não estivessem concentradas em um único sistema nervoso ou cérebro, mas distribuídas por todo o corpo, como os sistemas nervosos dos invertebrados modernos.

Os biólogos chamam o aparecimento repentino de muitas espécies novas de *radiação adaptativa*. É uma ideia importante. Um novo dispositivo biológico foi encontrado — multicelularidade — e agora suas possibilidades estavam sendo exploradas por muitas linhagens evolutivas diferentes. Como acontece com os protótipos (pense nas primeiras

carruagens de combustão interna sem cavalos), a maioria dos novos modelos não sobreviveu. Poucas espécies de ediacaranos têm descendentes óbvios hoje, e a maioria desapareceu há cerca de 550 milhões de anos. Caso o leitor se sinta tentado a ver isso como um sinal de fracasso evolutivo, vale a pena lembrar que nós, seres humanos, estamos por aqui há apenas 200 mil anos.

Os ediacaranos foram uma espécie de teste para a multicelularidade. O período cambriano, que veio logo depois, marca o início do que os biólogos chamam de éon fanerozoico, o éon da vida grande, que dura até os dias atuais. No período cambriano, houve uma segunda radiação adaptativa dos metazoários.

Os fósseis cambrianos foram identificados pela primeira vez em meados do século XIX pelo cientista inglês Adam Sedgwick. Na época, os estratos cambrianos eram os mais antigos a mostrar qualquer sinal de vida. Eles continham muitos fósseis grandes, principalmente trilobitas, que eram artrópodes, organismos modulares com esqueletos externos, como os insetos e crustáceos modernos. Os fósseis cambrianos estavam bem preservados porque muitos tinham esqueletos e conchas. Para os paleontólogos do século XIX, a vida parecia brotar totalmente formada, o que encantava aqueles que acreditavam em um deus criador. Hoje sabemos que a vida já existia havia 3,5 bilhões de anos; era apenas difícil ver as provas. O que a era cambriana marca não é o começo da vida, mas de uma exuberante radiação adaptativa de formas de vida multicelulares.

Os projetos do período cambriano seriam mais bem-sucedidos do que os do ediacarano, como se algumas falhas importantes tivessem sido resolvidas. Um dos truques de design mais bem-sucedidos desse período foi a modularidade. Juntam-se módulos corporais que são muito semelhantes para formar, digamos, uma criatura parecida com uma

minhoca. Em seguida, os genes ferramentais começam a modificar cada módulo para que alguns brotem pernas ou asas, enquanto outros se transformam em uma cabeça com uma boca, ou antenas, ou talvez um cérebro. Até você e eu somos modulares, embora nossos módulos sejam agora tão especializados que é difícil ver as semelhanças entre eles.

Tão bem-sucedidos foram os projetos cambrianos que todos os principais grupos (ou filos) de organismos grandes existentes hoje fizeram sua primeira aparição nesse período. A maioria apareceu no espantoso intervalo de 10 milhões de anos, a partir de 530 milhões de anos atrás. Nesse período (uma fração de segundo para um paleontólogo) concentrou-se talvez o trecho mais rápido de inovação biológica dos últimos 600 milhões de anos.<sup>7</sup>

Entre as espécies cambrianas estavam os primeiros Chordata (cordados), ou vertebrados. Trata-se do grande filo de animais a que pertencemos. Vertebrados são como tubos. Cada um deles tem uma medula espinhal, uma frente (com uma boca) e uma parte de trás (com um ânus). Eles também têm um sistema nervoso rudimentar. Os primeiros vertebrados ainda não tinham a bola concentrada de neurônios que chamamos de cérebro, mas possuíam sistemas nervosos com centenas ou milhares de células nervosas em rede que podiam processar muitas informações alimentadas a partir de células sensoriais, depois passavam decisões para outros órgãos que podiam tomar as medidas cabíveis. Os metazoários com sistemas nervosos simples podem ler e reagir a muito mais informações do que os organismos unicelulares. Assim, o Cambriano também marca o início de uma era na qual o processamento de informação se tornou mais elaborado e mais importante. Os modernos invertebrados marinhos chamados anfioxos, que possuem sistemas nervosos mas não têm verdadeiros cérebros,

podem ter alguma semelhança com os nossos primeiros ancestrais vertebrados.

Climas instáveis podem explicar o notável ritmo de evolução no período cambriano. Os níveis de oxigênio começaram a subir novamente, fornecendo parte da energia necessária para formar organismos multicelulares. Mas os níveis de dióxido de carbono aumentaram com muito mais rapidez, atingindo níveis muito mais altos do que hoje. Tratava-se de um mundo de estufa quente e úmida. Quaisquer que sejam as mudanças exatas, violentas oscilações climáticas e geológicas teriam aumentado o ritmo evolutivo, levando muitas espécies à extinção e forçando a evolução de muitos novos tipos de organismos grandes.

## ALTOS E BAIXOS EVOLUTIVOS: EXTINÇÕES EM MASSA E MONTANHA-RUSSA DA EVOLUÇÃO

Como exploradores que atravessam uma barreira montanhosa para chegar a uma terra nova, a invenção da multicelularidade abriu novas possibilidades para a vida. Os metazoários exploraram essas possibilidades em múltiplas radiações adaptativas. Novas formas de vida transformaram a crosta terrestre à medida que esqueletos e conchas feitas de carbonato de cálcio se acumulavam para formar grossas camadas de giz (pensem nos penhascos brancos de Dover). Plantas e animais grandes mudaram-se para a terra, aceleraram o desgaste e a erosão e desintegraram rochas para criar os primeiros solos do nosso planeta. Por fim, a clorofila das células das plantas transformou em verde grande parte da terra.

Essas mudanças não assumiram as formas suaves e majestosas que Darwin e sua geração esperavam da evolução. Em vez disso, a história da vida grande foi um passeio de montanha-russa imprevisível e perigoso. Os impactos de asteroides, as mudanças súbitas nas entranhas da Terra, as mudanças na atmosfera do planeta e as enormes erupções vulcânicas fizeram a evolução tomar caminhos novos e inesperados. A evolução foi “pontuada”, como Niles Eldredge e Stephen Jay Gould argumentaram em um famoso artigo publicado em 1972.<sup>8</sup> Tal como o clichê sobre a vida de um soldado, a evolução no Fanerozoico significou longos períodos de tédio pontuados por momentos de terror e violência ameaçadora à vida. A violência é mais aparente em períodos de extinção em massa.

Mais uma vez, vemos acaso e necessidade em ação. A qualquer momento, muitas misturas diferentes de espécies eram teoricamente

possíveis. Eventos aleatórios determinaram quais dessas espécies viriam a existir de fato. Durante as extinções em massa, grupos inteiros de espécies desapareceram de repente e aparentemente de forma aleatória. Como nas guerras humanas, as extinções em massa causaram um estrago horrível. Elas foram particularmente duras com espécies especializadas, porque os especialistas extremados, como os coalas modernos, tinham pouco espaço de manobra em períodos de mudanças rápidas. As extinções em massa também foram impiedosas com os organismos maiores, que precisam de mais comida e se reproduzem com demasiada lentidão para acompanhar as mudanças rápidas. Eventos de extinção em massa reorganizaram o baralho genético, criaram novos espaços evolucionários para os sobreviventes e estabeleceram novos experimentos evolutivos. E sempre foram seguidos por radiações adaptativas, períodos de rápida experimentação, durante os quais novos produtos biológicos eram lançados no mercado de massa de uma biosfera em mudança. Muitos dos experimentos mais exóticos desapareceriam rapidamente, deixando apenas os mais bem-sucedidos.

As primeiras extinções em massa aconteceram no éon arqueano. O grande evento de oxigenação, há 2,5 bilhões de anos, certamente matou muitos organismos bacterianos para os quais o oxigênio era tóxico. Com efeito, essa talvez tenha sido a maior extinção em massa de todas. Muitos grupos de espécies também pereceram durante os episódios de bola de neve terrestre do final do período proterozoico, e sabemos que muitos desapareceram no final do período ediacarano. Desde então, sabemos de pelo menos cinco eventos de extinção em massa nos quais mais da metade de todos os tipos de espécies existentes desapareceram.

A explosão cambriana terminou numa série de eventos de extinção que começaram há cerca de 485 milhões de anos. Muitas espécies de

trilobitas foram obrigadas a se retirar. O mesmo aconteceu com muitas das espécies cambrianas mais estranhas, cujos fósseis foram encontrados no xisto de Burgess, no Canadá, e na região de Chengjiang, na China.<sup>9</sup> O período ordoviciano também terminou num evento de extinção em massa há 450 milhões de anos, quando 60% de todos os gêneros podem ter desaparecido.

A maior de todas as extinções em massa ocorreu no final do período permiano, há 248 milhões de anos. Dessa vez, mais de 80% de todos os gêneros desapareceram, inclusive o último dos trilobitas. As causas exatas dessa extinção em massa permanecem incertas. Talvez tenha ocorrido em consequência da subida de magmas que romperam a crosta em enormes erupções vulcânicas que expeliram cinzas suficientes para bloquear a fotossíntese. Encontramos indícios modernos disso numa grande região vulcânica da Sibéria conhecida como Armadilhas Siberianas. As erupções bombearam enormes quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera e depois, quando a poeira baixou, os níveis de dióxido de carbono aumentaram de forma explosiva, os níveis de oxigênio caíram e os oceanos se aqueceram. Quando a Terra arrotou, a biosfera estremeceu. Segundo algumas estimativas, a temperatura dos oceanos pode ter chegado a 38 graus Celsius, quente o suficiente para matar a maioria dos organismos marinhos e interromper quase toda a fotossíntese nos mares. Oceanos mais quentes podem conter menos oxigênio e sustentar menos vida, e, bem abaixo da sua superfície, o degelo de bolas de metano congelado conhecidas como clatratos pode ter liberado enormes bolhas de metano. Foi uma *extinção em massa de efeito estufa* que matou por aquecimento, em vez de congelamento.<sup>10</sup> Num mundo sob efeito estufa extremo, organismos grandes sobreviveram

somente nos ambientes polares mais frios dos extremos norte e sul do vasto supercontinente da Pangeia.

## TERRA VERDE E ATMOSFERA OXIGENADA

Sob as violentas mudanças do início do Fanerozoico, uma nova biosfera estava em formação. A disseminação de plantas, fungos e animais pela terra transformou a superfície do planeta. Particularmente importante foi a disseminação de plantas fotossintetizadoras, porque consumiam grandes quantidades de dióxido de carbono e liberavam grandes quantidades de oxigênio. Isso redefiniu os termostatos da biosfera, criando um novo regime climático com níveis mais altos de oxigênio e níveis mais baixos de dióxido de carbono. Em suas características essenciais, esse regime dura até hoje.

Colonizar a terra foi extremamente difícil, um pouco como colonizar um novo planeta. A vida evoluíra e florescera na água por 3 bilhões de anos. Todas as células evoluíram num banho de água salgada. Os organismos flutuavam na água, extraíam dela os gases e substâncias químicas de que necessitavam e pescavam nela sua comida. Longe da água, eles precisavam de sistemas de apoio tão elaborados quanto qualquer traje espacial. Precisavam de peles duras que pudessem suportar a água e impedir que seus corpos secassem. Mas essas peles também tinham que ser permeáveis o suficiente para deixar entrar dióxido de carbono ou oxigênio. Era um caso de equilíbrio complicado. As folhas lidam com essas demandas opostas por meio de minúsculos poros chamados estômatos, que permitem a entrada de dióxido de carbono e a saída de água. O tamanho e o número de estômatos mudam dependendo da temperatura, da umidade e do nível de dióxido de carbono.

Como os organismos poderiam se reproduzir fora da água? Como poderiam proteger ovos ou bebês do terrível destino da dessecação? A água também fornecia condições para flutuar, o que quase não havia em terra. Para insetos minúsculos como pulgas, isso não importava. Eram leves demais para se preocupar com a gravidade, e é por isso que uma pulga pode pular alegremente de um penhasco. Mas para organismos grandes a gravidade *era* um problema. Eles precisavam de andaimes de osso ou madeira se quisessem se levantar. Uma vez em pé, precisavam de encanamentos sofisticados através dos quais os líquidos pudessem circular contra a gravidade para chegar a cada célula de seus corpos. As plantas circulavam líquidos através de raízes e canais internos, explorando a capacidade da água de subir através de passagens estreitas usando a ação capilar. Os animais desenvolveram bombas especiais (também conhecidas como corações) para circular líquidos e nutrientes e remover toxinas.

A colonização séria da terra por metazoários começou somente após a última extinção do Ordoviciano, há 450 milhões de anos. Foi quando, pela primeira vez, alguns intrépidos grupos de plantas e animais saíram dos oceanos na ponta dos pés, encorajados, talvez, pelo aumento de energia causado pelos níveis crescentes de oxigênio atmosférico.

As primeiras plantas vasculares, com tecidos que podiam circular líquidos e nutrientes, apareceram em terra há cerca de 430 milhões de anos. Fungos e animais vieram logo depois. Artrópodes simples, semelhantes a escorpiões, podem ter florescido em terra na mesma época das primeiras plantas vasculares. Os primeiros anfíbios certamente andaram pela terra há 400 milhões de anos, data de pegadas fósseis anfíbias encontradas na Irlanda e na Polônia. Os anfíbios evoluíram de peixes que eram capazes de respirar fora da água e andar nas águas rasas

de lagos e rios ressecados, como os modernos peixes pulmonados. Mas todos os anfíbios precisam ficar perto da água, onde depositam seus ovos. Os primeiros anfíbios foram os primeiros grandes vertebrados terrestres. Alguns eram tão grandes quanto um ser humano.

As plantas terrestres causaram um impacto particularmente grande na atmosfera ao inalar dióxido de carbono e exalar oxigênio. O nível de oxigênio atmosférico subiu rapidamente após o período ordoviciano, aumentando de cerca de 5% a 10% da atmosfera para níveis muito mais altos do que hoje, talvez para 35%, antes de se estabilizar. Desde cerca de 370 milhões de anos atrás, o nível de oxigênio permanece entre 17% e 30% da atmosfera.<sup>11</sup> Sabemos disso porque, durante todo esse período, os pesquisadores veem indícios de incêndios espontâneos e os incêndios não podem acontecer se o nível de oxigênio cair muito abaixo de 17%. O nível de oxigênio provavelmente atingiu o pico durante o período permiano (de 300 milhões a 250 milhões de anos atrás).

Um indicador do aumento dos níveis de oxigênio foi o aparecimento de recifes de corais, que precisam de enormes quantidades de oxigênio. Os primeiros grandes recifes de corais apareceram no período ordoviciano. Os corais são, na verdade, vastas colônias simbióticas de pequenos animais invertebrados geneticamente idênticos. Em um trecho, podemos considerá-los enormes animais em expansão com um esqueleto duro, mas um tanto disforme. Cada coral hospeda colônias de organismos fotossintetizantes unicelulares que lhe fornecem energia. Os recifes de corais ofereciam acomodações aconchegantes para muitos organismos de grande porte, como trilobitas, esponjas e moluscos.

O aumento do nível de oxigênio alimentou uma segunda onda de colonizadores metazoários da terra durante o período devoniano, que começou há cerca de 370 milhões de anos. As primeiras plantas com

esqueletos lenhosos que lhes permitiram resistir à gravidade apareceram cerca de 375 milhões de anos atrás, e as primeiras florestas surgiram logo depois. Elas fixavam enormes quantidades de carbono através da fotossíntese e, assim, enquanto a Terra ficava verde, os níveis de dióxido de carbono caíam para talvez um décimo dos níveis anteriores.<sup>12</sup> O impacto das primeiras florestas foi particularmente significativo porque ainda não havia organismos que pudessem decompor a lignina em madeira. É por isso que as florestas do período carbonífero (de 360 milhões a 300 milhões de anos atrás) estavam em sua maior parte enterradas no solo, junto com o carbono que haviam extraído da atmosfera. Com o tempo, elas se fossilizaram para formar as camadas de carvão que mais tarde impulsionaram a Revolução Industrial. Cerca de 90% dos depósitos de carvão de hoje foram enterrados durante o período de altos níveis de oxigênio, de cerca de 330 milhões a 260 milhões de anos atrás. Com muito oxigênio, incêndios florestais eram facilmente provocados por raios. Desse modo, o mundo carbonífero e o início do Permiano, apesar do frio, tinham provavelmente o cheiro acre dos incêndios florestais, um cheiro que ninguém detectará em outros planetas do nosso sistema solar porque eles não possuem o alto nível de oxigênio e as fontes lenhosas de combustível necessárias para a propagação de fogo.

As florestas carboníferas podem ter dobrado as taxas de fotossíntese, e isso duplicou efetivamente o orçamento energético total da biosfera, possibilitando a produção de muitos outros organismos.<sup>13</sup> As plantas reajustaram o termostato geológico da Terra porque aceleraram o desgaste das rochas ao moê-las e dissolvê-las em solos que podiam transportar carbono enterrado com mais facilidade para os oceanos; a partir dali, um pouco de carbono era levado para a profundidade no

manto terrestre. O carbono enterrado não podia mais reagir com o oxigênio para formar dióxido de carbono, então os níveis de oxigênio aumentaram. É por isso que a quantidade de oxigênio livre depende aproximadamente da quantidade de carbono enterrada no manto, de modo que os níveis de oxigênio atmosférico e dióxido de carbono tendem a se mover em direções opostas. O aumento do nível de oxigênio também permitiu novas reações químicas na crosta, criando muitos dos 4 mil tipos diferentes de minerais encontrados na Terra atualmente.<sup>14</sup>

Entre 450 milhões e 300 milhões de anos atrás, do final do período ordoviciano ao início do Permiano, florestas e metazoários terrestres transformaram a superfície da Terra, cobrindo os continentes de verde e redefinindo os termostatos da biosfera para criar o regime atmosférico fanerozoico superior de altos níveis de oxigênio e baixos níveis de dióxido de carbono.

## TENDÊNCIAS DE LONGO PRAZO: CORPOS E CÉREBROS MAIORES

Tal como a história da complexidade em geral, a história da vida grande foi moldada pelo acaso e pela necessidade. As extinções em massa ilustram o papel dramático desempenhado pelo acaso. Sem elas, a biosfera de hoje seria muito diferente. Mas a evolução nunca foi uma questão de puro acaso. Algumas mudanças eram mais prováveis do que outras. Assim, embora a casualidade feliz tenha moldado a história da vida grande, também houve tendências de longo prazo que persistiram apesar da turbulência causada pelos impactos de asteroides, erupções vulcânicas e extinções em massa. Essas tendências são tão importantes para nós quanto as catástrofes súbitas.

Uma dessas tendências foi em direção à grandeza. Para começar, foi essa tendência que nos deu os metazoários. Ela também estimulou a evolução de metazoários cada vez maiores, porque ser um gigante muitas vezes fazia bom sentido evolutivo. Afinal, organismos maiores têm menos predadores. Tente enfiar seus dentes em uma baleia-azul! Organismos grandes também precisam de menos alimento para cada unidade de peso corporal e, em geral, é mais fácil para eles evitar a catástrofe da dessecação.<sup>15</sup> Além disso, o regime atmosférico de muito oxigênio que surgiu no início do éon fanerozoico proporcionou a energia extra necessária para alimentar megametazoários. Com efeito, parece provável que organismos muito grandes floresciam melhor quando o nível de oxigênio era mais alto, o que geralmente significava períodos de baixos níveis de dióxido de carbono e climas mais frios. Isso valia tanto para os oceanos quanto para a terra, porque a água fria pode conter mais oxigênio do que a água morna.

À medida que os níveis de oxigênio subiam, muitas linhagens evolutivas diferentes experimentavam corpos maiores. Durante os períodos carbonífero e permiano, começamos a ver megainsetos e megavertebrados. Era possível encontrar libélulas com asas de cinquenta centímetros, ou criaturas parecidas com escorpiões de noventa centímetros de comprimento que pesavam vinte quilos. Os primeiros répteis apareceram no período carbonífero, que começou há cerca de 320 milhões de anos. Eles faziam parte de um novo grupo de animais, os amniotas, que incluíam répteis, aves e mamíferos. Ao contrário dos anfíbios, os amniotas podiam se reproduzir longe da água porque seus filhotes se desenvolviam em ovos, bolsas ou úteros protegidos. Os répteis acabariam por incluir alguns dos maiores animais que já andaram, bambolearam, se refestelaram ou galoparam pela terra.

À extinção em massa no final do período permiano seguiu-se uma nova radiação adaptativa durante o período triássico (de 250 milhões a 200 milhões de anos atrás). É quando vemos os primeiros grandes dinossauros. (Nem todos os dinossauros são grandes!) Mas no final do período triássico, o nível de oxigênio começou a diminuir mais uma vez, o mundo começou a esquentar e a vida ficou mais difícil para os metazoários grandes. O mundo triássico terminou abruptamente há 200 milhões de anos, em outro evento de extinção em massa por efeito estufa. As famílias de dinossauros sobreviventes desenvolveram mecanismos altamente eficientes para respirar em um mundo privado de oxigênio. Esses mecanismos podem ter estimulado o bipedalismo (pense no *T. rex* e nos pássaros modernos), porque nos répteis bípedes o tórax é mais aberto e a respiração não é controlada pelo movimento como é na caminhada bamboleante dos répteis quadrúpedes. Durante o período jurássico (de cerca de 200 milhões a 150 milhões de anos atrás), os níveis

de oxigênio subiram novamente, até se aproximarem dos níveis do mundo de hoje. E os dinossauros ficaram maiores novamente. Os maiores deles caminharam pesadamente pela Terra do final do período jurássico ao cretáceo, entre 160 milhões e 65 milhões de anos atrás. Equipados com pulmões mais eficientes do que seus ancestrais do Triássico, eles usavam as grandes quantidades de energia disponíveis numa atmosfera rica em oxigênio para alimentar seu enorme corpo.

Os primeiros pássaros verdadeiros evoluíram no final do período jurássico. Eles também dependiam de altos níveis de oxigênio atmosférico, porque, como todo piloto sabe, o voo exige muita energia. O *Archaeopteryx*, uma das primeiras criaturas parecidas com pássaros, deixou fósseis que foram descobertos na Alemanha em 1861, apenas dois anos após a publicação de *A origem das espécies*, de Darwin. Ele viveu há cerca de 150 milhões de anos e era do tamanho de um corvo. Para Darwin, essa descoberta ofereceu fortes evidências para sua teoria da evolução pela seleção natural, porque mostrava a existência de espécies transicionais, a meio caminho entre répteis e aves. O *Archaeopteryx* tinha muitas características semelhantes às dos pássaros, mas também mantinha características reptilianas, como garras, uma cauda óssea e dentes. Achados recentes mostraram que muitas espécies de pássaros com dentes evoluíram durante o Cretáceo e coexistiram com dinossauros voadores.

Mamíferos, como os outros amniotas (répteis e aves), também apareceram após a extinção em massa do Permiano. Os mamíferos também acabariam por produzir alguns gigantes, mas depois de quase 200 milhões de anos. Antes disso, eles viviam em uma modesta obscuridade, nas sombras de um mundo dominado por dinossauros. Durante o Triássico, o Jurássico e o Cretáceo (de 250 milhões a 65

milhões de anos atrás), a maioria dos mamíferos era pequena e vivia em tocas, um pouco como os roedores modernos.

Os mamíferos constituem uma classe de animais de sangue quente relacionados aos outros amniotas, os répteis e as aves, mas apresentam diferenças fundamentais em relação às outras duas classes. O cérebro dos mamíferos tem um neocórtex que faz deles excelentes calculadores. Eles têm pelos (sim, até mesmo os seres humanos têm pelos, embora menos que a maioria dos mamíferos) e, na maioria dos casos, cuidam mais de seus filhotes. Lineu, o fundador da taxonomia moderna, foi o primeiro a chamar de mamíferos os animais de nossa classe, conforme outra característica distintiva: todos os mamíferos nutrem seus filhotes com leite das glândulas mamárias. Para os paleontólogos, a característica distintiva mais visível dos fósseis de mamíferos são seus dentes. Até mesmo os mais antigos dentes de mamíferos têm cúspides, de modo que os dentes superiores e inferiores podem se encaixar, o que lhes permite mastigar novos tipos de alimentos e moê-los com mais eficiência do que a maioria dos répteis.

Os mamíferos ilustram outra poderosa tendência evolutiva, no sentido de um processamento de informações mais elaborado. Isso é visível em todo o Fanerozoico, mas particularmente entre os animais e, de modo mais notável, entre os mamíferos.

Vimos que todos os organismos vivos são informívoros. Eles coletam informações, processam-nas e agem baseados nelas. Nos organismos mais simples, inclusive nos procariontes, o segundo estágio (de processamento) é rudimentar, chegando com frequência a pouco mais do que uma espécie de chave de liga/desliga, como em: “Está muito quente aqui, então gire seus flagelos no sentido horário e afaste-se

rapidamente”. Reflexos simples de dor e prazer orientam muito o processamento eficaz de informações, mesmo em metazoários simples.

Mas, à medida que se tornavam maiores e mais complexos, os organismos precisavam de mais informações sobre seus ambientes. A seleção natural equipou os organismos grandes com o desejo de mais informações, porque boas informações eram vitais para o sucesso deles. É por isso que, quando um ser humano resolve um quebra-cabeça, o cérebro recebe o mesmo barato que recebe da comida e do sexo.<sup>16</sup> A seleção natural também deu aos organismos grandes mais sensores e mais *tipos* de sensores: som, pressão, acidez, luz. E a seleção natural desenvolveu um repertório crescente de reações possíveis. À medida que o número e o intervalo de inputs e outputs aumentavam, a fase de processamento se tornava mais sofisticada, de modo que mais células nervosas eram dedicadas a essa tarefa. Nos animais, os nervos se reuniam em nós, gânglios e cérebros, formando redes de interruptores parecidos com transistores que conectavam centenas, milhões ou bilhões de neurônios que podiam computar em paralelo. Isso lhes permitiu fazer modelos de características importantes do mundo externo e até mesmo de possíveis futuros. Nenhuma criatura inteligente (nem mesmo você ou eu) está em contato direto com seu ambiente. Em vez disso, vivemos todos em uma rica realidade virtual construída por nosso cérebro. Nosso cérebro gera e atualiza constantemente mapas das características mais salientes de nosso corpo e do ambiente ao nosso redor, assim como os atuais cientistas do clima fazem modelos dos ambientes em transformação.<sup>17</sup> Esses mapas nos permitem manter a homeostase. Eles nos ajudam a reagir apropriadamente, na maior parte do tempo, ao incessante redemoinho de mudanças ao nosso redor.

A tomada de decisões funciona em vários níveis diferentes nas criaturas inteligentes. Algumas decisões precisam ser tomadas rapidamente se não houver tempo suficiente para uma deliberação cuidadosa. Outros mecanismos de tomada de decisão são mais lentos e mais pesados, mas oferecem mais opções. Os simples interruptores liga/desliga dos sensores de dor controlam grande parte do comportamento, até mesmo nos metazoários mais complexos. Ponha sua mão numa chama e a retirará antes de pensar nela. As emoções, dominadas pelo sistema límbico, também possibilitam uma tomada de decisões rápida, ao criar predisposições e preferências que levam a muitas decisões importantes e acertadas, na maior parte do tempo. Charles Darwin entendia que as emoções são tomadores de decisão que evoluíram através da seleção natural para ajudar os organismos a sobreviver. É improvável que o antílope que queira abraçar leões transmita seus genes a qualquer filhote. As emoções mais básicas, aquelas menos sensíveis ao controle consciente, parecem borbulhar dentro de nós. Entre elas estão o medo e a raiva, a surpresa e a repulsa e também, talvez, um senso de alegria. Elas nos predis põem a reagir de certas maneiras e enviam os sinais químicos que preparam nosso corpo para correr ou encarar, atacar ou abraçar.<sup>18</sup> As emoções conduzem a tomada de decisões em todos os animais de cérebro grande, e algumas emoções, como o medo, provavelmente estão presentes em todos os vertebrados e talvez em alguns invertebrados, em particular nos mais inteligentes, como os polvos. As preferências que as emoções criam para determinados resultados e comportamentos estão por trás do senso humano de sentido e ética.

A faculdade que descrevemos frequentemente como *razão* é apenas um dos muitos tomadores de decisões biológicas. Ela toma decisões

importantes se o cérebro é grande o suficiente, se há bastante tempo disponível e se outros sistemas estão num impasse e não conseguem gerar respostas claras. Será que preciso mesmo gastar tanta energia correndo se aquilo não é de fato um leão? Meu rival está fazendo ameaças falsas ou preciso reagir?

Sensações, emoções e pensamentos criam juntos o mundo subjetivo interior que todos os seres humanos, e provavelmente muitas outras espécies de cérebro grande, experimentam. O estado que descrevemos como *consciência* parece ser um modo de atenção nitidamente focalizada convocado pelo cérebro, como se fosse por um tribunal, quando decisões novas, difíceis e importantes precisam ser tomadas. Isso sugere que a consciência está presente em algum grau em muitos organismos cujo cérebro é grande o suficiente para fornecer o espaço de trabalho necessário para tomadas de decisão realmente complexas.<sup>19</sup> Mas ela não é necessária para decisões rotineiras.

Acrescente-se a memória a esses sistemas de tomada de decisão e temos as bases para o aprendizado complexo, a capacidade de registrar os resultados de decisões anteriores e usar esses registros para tomar decisões melhores no futuro. Uma espécie de peixe conhecido como bodião-limpador (*Labroides dimidiatus*), por exemplo, limpa os dentes de peixes que poderiam facilmente comê-lo. Mas ele tem que aprender quais clientes não vão comê-lo e podem proporcionar um alimento gratuito entre seus dentes. A memória pode armazenar os resultados das decisões tomadas conscientemente e usá-las para respostas rápidas e automatizadas. Depois que aprendemos a dirigir um carro, não precisamos pensar numa longa lista do que fazer ao ver um sinal vermelho. Nosso corpo está simplesmente acostumado com isso e nem percebemos que o pé pressiona o freio.

Esses elaborados sistemas de tomada de decisão e construção de modelos evoluíram ao longo do éon fanerozoico. Eles evoluíram de modo mais espetacular nos animais porque eles precisam tomar muito mais decisões do que as plantas. Na maioria dos invertebrados, as redes neuronais permaneceram distribuídas por todo o corpo, embora muitas vezes se concentrassem em nódulos ou gânglios específicos. Alguns invertebrados, como os polvos, construíram poderosos sistemas de processamento de informações a partir dessas redes; a maioria dos neurônios de um polvo está em seus tentáculos. Na linhagem dos vertebrados, muitos neurônios também chegam às profundezas do corpo, onde mantêm contato com as células sensoriais e as células motoras que executam as decisões. Mas, à medida que os sensores se multiplicavam e o processamento se tornava mais crítico, um número cada vez maior de neurônios se reunia nos cérebros, onde eles se tornavam processadores de informações especializados. O processamento de informações foi particularmente importante nas complexas linhagens de aves e mamíferos que consomem muita energia, embora esses tipos muito diferentes de organismos tenham desenvolvido diferentes subsistemas para lidar com grandes quantidades de dados.<sup>20</sup>

Nos mamíferos, a importância crescente do processamento de informações ajuda a explicar a evolução e o crescimento do córtex, ou seja, das camadas cinzentas e externas do cérebro. O córtex proporciona muito espaço para cálculos e muito mais capacidade de cálculo, por isso possibilitou uma melhor resolução de problemas em situações desconhecidas ou quando outros sistemas de tomada de decisão estavam num impasse. Por fim, os mamíferos mais inteligentes desenvolveriam sistemas gerais de processamento de informações e solução de problemas que eram para o mundo bacteriano o que a internet é para um ábaco. A

evolução dos sistemas aprimorados de resolução de problemas e processamento de informações acabaria levando à explosão de informações desencadeada por nossa notável espécie.

## UM ASTEROIDE ATERRISSA — UM GOLPE DE SORTE PARA OS MAMÍFEROS

Durante muito tempo, a força dos dinossauros pareceu superar o cérebro dos mamíferos. Então, há 65 milhões de anos, tudo mudou num piscar de olhos.

O mundo dos dinossauros desapareceu em poucas horas quando um asteroide de dez a quinze quilômetros de largura colidiu com a Terra.<sup>21</sup> O acidente causou um grande evento de extinção, durante o qual desapareceu cerca de metade de todos os gêneros. Os geólogos referem-se a ele como o evento K/T porque ocorreu na fronteira entre o período cretáceo (frequentemente abreviado pela letra K, da palavra alemã *Kreide*, em português cré ou giz) e o período terciário, um nome mais antigo para a era cenozoica, que começou há 65 milhões de anos.

Quando caiu na Terra, o asteroide estava se movendo a trinta quilômetros por segundo (cerca de 100 mil quilômetros por hora), tendo levado apenas alguns segundos para atravessar a atmosfera da Terra. Sabemos exatamente onde caiu: na cratera Chicxulub, na península de Yucatán, no México. O asteroide evaporou quando perfurou a crosta, deixando uma cratera de quase 200 quilômetros de diâmetro. Rochas derretidas foram atiradas para o ar, onde formaram nuvens de poeira que bloquearam a luz do Sol por muitos meses. O calcário evaporou, pulverizando dióxido de carbono na atmosfera. Uma área de centenas de quilômetros ao redor do ponto de impacto foi despojada de vida. Centenas de quilômetros além dessa zona, as florestas se acenderam em enormes tempestades de fogo. No mar, um tsunami formou uma parede de água que desabou nas margens do golfo do México e matou peixes e dinossauros a centenas de quilômetros de distância. Na Formação Hell

Creek, em Montana e Wyoming, encontram-se fósseis de peixes cujas brânquias estão cheias de vidro do impacto do asteroide.<sup>22</sup>

Mais longe, os impactos imediatos foram menos violentos. Mas dentro de semanas toda a biosfera havia mudado. A fuligem bloqueou a luz solar, criando o que poderíamos descrever hoje como um inverno nuclear. Ácido nítrico choveu do céu, matando a maioria dos organismos que tocava. A superfície da Terra ficaria em total escuridão por um ou dois anos, impedindo a fotossíntese, a corda de salvação que ligava a vida ao Sol. Quando a poeira diminuiu e a luz começou a retornar através da neblina, a Terra aqueceu rapidamente, porque a atmosfera continha agora muito mais dióxido de carbono e metano. Alguns anos após o impacto, os miseráveis sobreviventes puderam recomeçar a fotossintetizar e respirar, mas o fizeram em um mundo de estufa.

Deve ter levado milhares de anos para a biosfera retornar a algo parecido com a normalidade. Nesse meio-tempo, talvez metade de todos os gêneros anteriormente existentes de plantas e animais tenha desaparecido. Como é típico em tais crises, as espécies grandes foram particularmente atingidas, porque precisam de mais energia, são menos numerosas e se reproduzem mais lentamente do que criaturas menores. É por isso que os grandes dinossauros morreram. Mas os pássaros modernos são descendentes de dinossauros menores, alguns dos quais conseguiram sobreviver. Organismos menores, como mamíferos semelhantes a roedores, se saíram um pouco melhor, e alguns deles se tornariam nossos ancestrais.

A primeira prova do impacto do asteroide foi captada em rochas na Itália pelo geólogo Walter Alvarez e sua equipe. Os geólogos já sabiam que havia diferenças marcantes entre as rochas antes e depois da linha

divisória do final do período cretáceo. Fósseis de plâncton conhecidos como foraminíferos são comuns nos estratos mais antigos, pouco antes dessa data, mas desaparecem depois. O que não estava claro era se a mudança levava dezenas de milhares de anos ou apenas um ano ou dois. Em 1977, num sítio arqueológico perto de Gubbio, na Itália, a equipe de Alvarez encontrou níveis muito altos do raro elemento irídio, que datavam do final do período cretáceo. Isso era estranho, porque o irídio é raro na Terra, embora seja comum em asteroides. Alvarez e seus colegas descobriram níveis igualmente altos de irídio em muitos outros sítios na Itália, e hoje sabemos de pelo menos uma centena de locais semelhantes em todo o mundo. Começou a parecer que o irídio fora trazido por um asteroide, o que sugeriu um evento catastrófico.

Na época, a maioria dos geólogos aceitava a ideia de que toda mudança geológica era gradual, e poucos compraram a novidade. Eles queriam provas diretas, um flagrante geológico. Isso aconteceu em 1990, quando se mostrou que a cratera Chicxulub era do tamanho certo e tinha sido criada na data certa. Desde então, a maioria dos geólogos aceita não apenas que o impacto de um asteroide acabou com os dinossauros, como também que tais eventos catastróficos podem ter ocorrido muitas vezes na história da Terra. É verdade que há também indícios de grandes erupções vulcânicas ao redor da fronteira K/T que podem ter prejudicado a saúde da biosfera, mas há poucas dúvidas agora de que o golpe fatal foi causado por um asteroide.

O mundo pós-Chicxulub é o mundo em que nossos ancestrais mamíferos evoluíram. O mundo da era cenozoica, os últimos 65 milhões de anos da história da Terra.

## APÓS O ASTEROIDE: UMA RADIAÇÃO ADAPTATIVA DOS MAMÍFEROS

Como mamíferos, os seres humanos compartilham 90% de seus genes, ou cerca de 3 bilhões de pares de bases em nosso DNA, com outros mamíferos, de ratos a guaxinins. Em algum lugar entre os outros 10% de nosso DNA estão os genes que nos diferenciam.

Como todos os mamíferos, temos sangue quente, o que significa que precisamos de mais energia do que a maioria dos répteis para manter a temperatura do corpo elevada e o cérebro em funcionamento. Nosso cérebro precisa ser poderoso, porque tem de gerar muitos truques ecológicos para manter esses grandes fluxos de comida e energia. Embora não fossem maiores que os ratos, as primeiras criaturas parecidas com mamíferos provavelmente já amamentavam seus filhotes, como os mamíferos de hoje, e tinham cérebro excepcionalmente grande em comparação com o tamanho do corpo. A divisão básica entre marsupiais (mamíferos cujos filhotes precisam de proteção especial e nutrição, muitas vezes em bolsas) e placentários (mamíferos cujos filhotes são alimentados dentro do útero por uma placenta) remonta a pelo menos 170 milhões de anos.

Durante os longos 150 milhões de anos dos períodos jurássico e cretáceo, a maioria das espécies de mamíferos permaneceu pequena, deslocando-se através da vegetação rasteira iluminada pelo luar.<sup>23</sup> Tinham muitas formas diferentes. Alguns eram parecidos com cães, como o *Repenomamus*, animal grande o suficiente para comer pequenos dinossauros e seus bebês. Alguns nadavam e retornavam aos oceanos. Alguns eram parecidos com morcegos, alguns comiam insetos, alguns subiam em árvores. Há cerca de 150 milhões de anos, o mundo dos

mamíferos foi alterado pela evolução de novos tipos de plantas para concorrer com as coníferas e samambaias que haviam dominado o mundo vegetal até então. Eram as *angiospermas*, plantas com frutos e flores, como as que dominam as florestas e os bosques, os parques e os quintais de hoje. As plantas florescentes proporcionavam uma boa alimentação para os mamíferos com dentes projetados para comer frutas e sementes ou os insetos que também comiam plantas florescentes ou ajudavam a polinizá-las.

O impacto do asteroide que derrubou os dinossauros também pode ter matado três quartos de todas as espécies de mamíferos existentes. Mas a maioria dos mamíferos ainda era pequena, então alguns se esgueiraram através da crise evolucionária. Depois que o planeta retornou para alguma coisa parecida com a normalidade, os sobreviventes do asteroide Chicxulub viram-se num mundo novo e estranho. Com o desaparecimento dos dinossauros, surgiram novas oportunidades. Os mamíferos se diversificaram numa nova radiação evolutiva, como os pequenos negócios fariam hoje se todas as grandes empresas declarassem falência da noite para o dia. Muitas espécies de mamíferos se tornaram grandes. Em meio milhão de anos, passou a haver mamíferos herbívoros do tamanho de vacas e carnívoros igualmente grandes. Havia também primatas, membros da ordem dos mamíferos que moram em árvores e comem frutos, dos quais descendemos. Embora os primeiros primatas já existissem no mundo dos dinossauros, eles floresceram somente depois que os dinossauros saíram de cena.

Havia mais uma crise a ser superada antes que os mamíferos pudessem dominar a Terra. Trata-se do máximo térmico do Paleoceno-Eoceno (PETM em inglês, para os que adoram acrônimos), um curto e

agudo choque de efeito estufa na fronteira entre as épocas do Paleoceno e do Eoceno, há cerca de 56 milhões de anos. Foi um evento prejudicial o suficiente para levar muitas espécies à extinção. O PETM é de interesse atual porque é o período mais recente de aquecimento rápido na história da Terra e, portanto, pode nos ajudar a entender a mudança climática de hoje. Os paralelos são assustadores. As quantidades de dióxido de carbono liberadas na atmosfera durante o PETM eram semelhantes às liberadas hoje pela queima de combustíveis fósseis e, há 56 milhões de anos, o resultado foi um aumento entre cinco e nove graus Celsius nas temperaturas globais médias.<sup>24</sup>

O que provocou esse aquecimento repentino? A atividade vulcânica foi extraordinariamente intensa entre 58 milhões e 56 milhões de anos atrás, e o dióxido de carbono dos vulcões teria aumentado os níveis de dióxido de carbono atmosférico. Mas então algo aconteceu com muita rapidez, durante um período de talvez 10 mil anos, mais ou menos o tempo que decorreu na história da humanidade desde o surgimento da agricultura. Ao terminar esse período, muitas espécies de plantas, animais e habitantes dos mares haviam desaparecido. A melhor hipótese atual sugere que os oceanos polares esquentaram até o ponto em que clatratos de metano (bolas congeladas de metano, que parecem gelo, mas entram em ignição se acendermos um fósforo nelas) derreteram de repente, liberando grandes quantidades de metano, um gás de efeito estufa ainda mais poderoso que o dióxido de carbono. Isso teria aquecido as coisas com muita rapidez. Se essa história estiver correta, precisamos ficar de olho bem atento aos clatratos de metano que existem nos oceanos polares atuais.

Depois de um pico climático que durou talvez 200 mil anos, as temperaturas globais começaram uma longa e lenta queda em direção a

temperaturas mais baixas, com algumas breves reversões. Os níveis de dióxido de carbono começaram a cair mais uma vez, enquanto os níveis de oxigênio subiam. As diferenças de temperatura entre o equador e as regiões polares aumentaram, e o gelo se espalhou pelo Ártico e pela Antártica, bloqueando a água nas geleiras, de modo que o nível dos oceanos baixou.

O resfriamento foi causado em parte por mudanças nos ciclos orbitais e na inclinação da própria Terra. Essas mudanças são conhecidas como ciclos de Milankovitch, nome do cientista que as descreveu pela primeira vez. À medida que a órbita e a inclinação da Terra se alteravam, a quantidade de energia que atingia a Terra a partir do Sol mudava de maneira sutil. Processos tectônicos também podem ter entrado em ação à medida que o oceano Atlântico se alargava e o grande continente meridional de Gondwana se fragmentava nos continentes modernos separados. A Antártica se instalou acima do polo Sul e proporcionou uma plataforma para o acúmulo de grandes camadas de gelo, enquanto os continentes do norte circundavam o oceano polar, isolando a região polar do norte das correntes equatoriais quentes. Enquanto isso, a colisão da placa indiana com a Ásia erguia o Himalaia, que acelerou a erosão e aumentou a quantidade de carbono que desceu do ar para o mar e a crosta terrestre.

Os organismos vivos também podem ter ajudado a resfriar a biosfera. Nos últimos 30 milhões de anos, à medida que os níveis de dióxido de carbono caíam, novos tipos de plantas evoluíram, entre elas as gramíneas que cobrem as savanas modernas e os gramados das casas de classe média. Elas usavam uma nova forma de fotossíntese — a fotossíntese C<sub>4</sub> —, que era mais eficiente do que a fotossíntese C<sub>3</sub> usada por árvores e arbustos. Por ser mais eficiente, ela sugava mais carbono da atmosfera.<sup>25</sup>

Quaisquer que sejam as causas exatas, a tendência de resfriamento que começou há cerca de 50 milhões de anos continuou até os dias atuais. Em torno de 2,6 milhões de anos atrás, no início da época do Pleistoceno, o mundo entrou na atual fase das idades periódicas do gelo. O mundo não estava tão frio há 250 milhões de anos, desde quando a própria Pangeia se dividira, no final do período permiano. Há 50 milhões de anos, neste mundo pós-dinossauros, pós-PETM, de mudanças climáticas frias e erráticas, evoluíram nossos ancestrais primatas.

PARTE III  
NÓS

## 7. Seres humanos: limiar 6

*Uma linguagem comum conecta os membros de uma comunidade a uma rede de compartilhamento de informações com poderes coletivos fantásticos.*

Steven Pinker, *O instinto da linguagem*

*A humanidade inteira possui uma característica comum que os historiadores podem esperar compreender com a mesma firmeza com que podem compreender o que une qualquer grupo menor.*

William H. McNeill, *Mythistory*

O surgimento dos seres humanos em nossa história das origens é assunto sério. Chegamos há apenas algumas centenas de milhares de anos, mas hoje estamos começando a transformar a biosfera. No passado, grupos inteiros de organismos, como as cianobactérias, mudaram a biosfera, mas nunca uma única espécie exerceu tamanho poder. E estamos fazendo algo totalmente novo. Como nós humanos podemos compartilhar mapas individuais do nosso entorno, acumulamos uma rica compreensão coletiva do espaço e do tempo que está por trás de todas as nossas histórias das origens. Essa conquista, aparentemente exclusiva de nossa espécie, significa que hoje uma minúscula parte do universo está começando a se entender.

Nosso relato da história humana mal tocará nas coisas que os historiadores costumam discutir: as guerras e os líderes, os Estados e os impérios, ou a evolução de diferentes tradições artísticas, religiosas e filosóficas. Em vez disso, vamos ficar com os principais temas da nossa história moderna das origens. Observaremos o surgimento de novas formas de complexidade, criadas, dessa vez, por uma nova espécie que usou a informação de novas maneiras para explorar fluxos de energia cada vez maiores. Veremos como os seres humanos, ligados primeiro a comunidades locais, mas posteriormente a todo o mundo, começaram a transformar a biosfera, devagar no início, depois com mais rapidez, até nos tornarmos hoje uma espécie que muda o planeta. Como usaremos nosso poder, isso não está claro. Mas já sabemos que os seres humanos e, com efeito, toda a biosfera estão num momento de profunda e talvez turbulenta mudança.<sup>1</sup>

Como chegamos até aqui? Nossa história moderna das origens pode ajudar-nos a nos orientar, situando a história humana dentro da história muito maior do planeta Terra e do universo como um todo. A vista do topo da montanha pode nos ajudar a ver o que nos diferencia.

## A EVOLUÇÃO DOS PRIMATAS NUM MUNDO EM RESFRIAMENTO

Do ponto de vista cultural, nós humanos somos espantosamente diversificados, e isso faz parte do nosso poder. Porém, do ponto de vista genético, somos mais homogêneos do que nossos parentes vivos mais próximos, os chimpanzés, gorilas e orangotangos. Não existimos por tempo suficiente para nos diversificar muito. Além disso, somos extraordinariamente sociáveis e adoramos viajar, de modo que os genes humanos se moveram com muita liberdade de grupo para grupo.

Nós pertencemos à ordem dos mamíferos primatas, que inclui lêmures, macacos e grandes símios. E compartilhamos muita coisa com nossos parentes primatas. Os primeiros primatas quase certamente viviam em árvores, e os jovens humanos (inclusive eu quando jovem) adoram subir em árvores e são bons nisso. Para subir em árvores, é preciso ter dedos nas mãos e ou nos pés que possam agarrar. Para pular de galho em galho, é uma boa ideia ter visão estereoscópica para poder avaliar distâncias. Isso significa ter dois olhos na frente do rosto, com linhas de visão sobrepostas (não tente pular de galho em galho com um olho fechado). Assim, todos os primatas têm mãos e pés que podem agarrar e face achatada com olhos na frente.

Os primatas são excepcionalmente inteligentes. Seu cérebro é grande demais em relação ao corpo, e a camada frontal superior do cérebro, o neocórtex, é gigantesca. Na maioria das espécies mamíferas, o córtex é responsável por entre 10% e 40% do tamanho do cérebro. Nos primatas, é responsável por mais de 50% e, nos seres humanos, por até 80%.<sup>2</sup> Os humanos são excepcionais pela enorme quantidade de neurônios corticais. Eles têm cerca de 15 bilhões, ou mais do que o dobro que os

chimpanzés (com cerca de 6 bilhões).<sup>3</sup> As baleias e os elefantes, os próximos da lista dos que têm neurônios corticais, têm cerca de 10 bilhões de neurônios corticais, mas têm cérebro menor que o dos chimpanzés em relação ao tamanho do corpo. Cérebros grandes significam que os primatas são mestres em adquirir, armazenar e usar informações sobre o ambiente ao seu redor.

Por que o cérebro dos primatas é tão grande? Isso pode parecer óbvio. O cérebro não é obviamente uma coisa boa? Não necessariamente, porque ele devora energia. Precisa de até vinte vezes mais energia do que a quantidade equivalente de tecido muscular. No corpo humano, o cérebro usa 16% da energia disponível, embora seja responsável por apenas 2% da massa corporal. É por isso que, diante da escolha entre músculos e cérebro, a evolução preferiu geralmente mais força e menos cérebro. E é por isso que existem tão poucas espécies muito inteligentes. Algumas espécies são tão desdenhosas do cérebro que o tratam como um luxo descartável. Existem espécies de lesmas-do-mar que têm minicérebro quando jovens. Elas o usam enquanto viajam pelos mares em busca de um poleiro de onde possam peneirar alimentos. Mas, depois que encontram seu poleiro, não precisam mais de um equipamento tão caro, e então... comem o próprio cérebro. (Existe uma piada cruel, de que são parecidas com professores universitários depois que conseguem estabilidade no emprego.)<sup>4</sup>

No entanto, os cérebros dos primatas parecem valer o que custam. Eles são necessários para gerir as mãos e os pés hábeis. E, numa espécie muito visual, são necessários para processar imagens (aquilo a três árvores de distância é uma ameixa madura?), porque as imagens devoram o poder de processamento no cérebro, tal como nos computadores. E, mais importante ainda, os primatas são sociáveis,

porque viver em grupos proporciona proteção e apoio. A pressão para viver em grandes grupos aumentou em terrenos abertos e expostos, como os prados e as matas de um mundo mais fresco e pós-PETM. Para viver com sucesso com outros membros de sua espécie, é preciso acompanhar os relacionamentos em constante mudança entre membros da família, amigos e inimigos. Quem está por cima e quem está por baixo? Quem é amistoso e quem não é? Quem me deve favores e com quem estou em dívida? São tarefas computacionais cuja complexidade aumenta exponencialmente à medida que os grupos ficam maiores. Se houver apenas três outros indivíduos, é provável que possamos lidar com a situação. Se houver cinquenta ou cem, os cálculos são muito mais complicados.

Para viver em grupo, é preciso também entender o cérebro dos outros. Intuir os pensamentos e sentimentos dos outros pode ter sido um passo importante em direção ao aumento da consciência do que está acontecendo em nossa mente.<sup>5</sup> A observação atenta das sociedades de primatas mostra que, se eles errarem esses cálculos sociais, provavelmente comerão pior, estarão menos protegidos, serão espancados com mais frequência e terão menos chances de ser saudáveis e ter filhos também saudáveis.<sup>6</sup> Portanto, a sociabilidade, a cooperação e o poder intelectual parecem ter evoluído juntos na história dos primatas. Com efeito, parece haver uma correlação aproximada entre o tamanho dos grupos de primatas e o tamanho do cérebro. Fica claro que muitas linhagens de primatas estavam dispostas a pagar mais um imposto de entropia, o imposto sobre o cérebro, se isso lhes permitisse viver em grupos maiores.

Os primeiros primatas evoluíram provavelmente antes que os dinossauros tivessem sido exterminados, mas os primeiros fósseis

sobreviventes de primatas datam de vários milhões de anos após a aterrissagem de Chicxulub. Nós pertencemos ao grupo dos grandes primatas sem cauda conhecidos como símios (ou antropoides). Eles evoluíram há cerca de 30 milhões de anos e floresceram e se diversificaram na África e na Eurásia, há 20 milhões de anos. Os grandes símios (ou *hominídeos*) incluem, hoje, os orangotangos, gorilas e chimpanzés, bem como os seres humanos. Seus ancestrais evoluíram em um mundo pós-PETM de queda dos níveis de dióxido de carbono e climas mais frios e menos previsíveis. A instabilidade climática pressionou fortemente o acelerador evolutivo, forçando muitas espécies diferentes a se adaptarem com rapidez e com frequência. A partir de cerca de 10 milhões de anos atrás, os climas se tornaram mais secos e frios em grande parte da extensão habitada pelos grandes símios, e a linhagem deles foi selecionada, talvez de forma muito severa, à medida que as florestas foram substituídas por pastagens. Nossos ancestrais foram sobreviventes dessa marcha forçada evolutiva.

Antes da década de 1970, a maioria dos paleontólogos estava convencida, com base em indícios fósseis, de que os humanos divergiram de outros símios há pelo menos 20 milhões de anos. Mas, em 1968, os geneticistas Vincent Sarich e Allan Wilson mostraram que poderíamos estimar quando duas espécies divergiram comparando o DNA de espécies que estão vivas hoje, porque grandes extensões de DNA, particularmente aquelas partes que não codificam genes, mudam de forma aleatória e em um ritmo relativamente consistente. Comparações genéticas que usaram esses insights mostraram que humanos, chimpanzés e gorilas compartilhavam um ancestral comum até cerca de 8 milhões de anos atrás, quando os ancestrais dos gorilas modernos decidiram seguir seu próprio caminho. Humanos e chimpanzés compartilharam um ancestral

comum até cerca de 6 milhões ou 7 milhões de anos atrás. Em outras palavras, em algum lugar da África, há 6 milhões ou 7 milhões de anos, existiu uma criatura da qual descendem os seres humanos modernos e os chimpanzés. Ainda não temos restos fósseis dessa criatura, mas a genética moderna nos diz que ela estava realmente lá.

Os chimpanzés e os humanos modernos ainda compartilham bem mais de 96% de seus genomas. Mas, com 3 bilhões de pares de bases em cada genoma, isso significa que cerca de 35 milhões de letras genéticas, ou pares de bases, são diferentes. Escondidas entre essas cartas genéticas divergentes estão as pistas que podem nos dizer por que os humanos e os chimpanzés tiveram histórias tão radicalmente diferentes, particularmente nos últimos milênios. Por que nossos parentes mais próximos estão agora reduzidos a populações remanescentes de algumas centenas de milhares, enquanto existem agora mais de 7 bilhões de seres humanos que dominam a biosfera?

## HISTÓRIA INICIAL DOS HOMINÍNIOS: QUANDO SURGIRAM OS PRIMEIROS SERES HUMANOS?

Todas as espécies do lado humano da divisão evolutiva entre humanos e chimpanzés são conhecidas como hominínios. Nos últimos cinquenta anos, os paleontologistas descobriram restos fósseis (às vezes apenas um osso do dedo ou alguns dentes) de talvez trinta ou mais espécies de hominínios. Digo *talvez* porque decidir o que é uma espécie distinta depende do paleontólogo. Alguns gostam de dividir: veem muitas espécies diferentes de hominínios. Outros gostam de agrupar: veem menos espécies, mas muitas variações dentro de cada espécie. Hoje somos a única espécie de hominínios sobrevivente. Isso é incomum, porque até recentemente, há 20 mil ou 30 mil anos, várias espécies diferentes de hominínios cruzavam as savanas da África e da Eurásia ao mesmo tempo. O desaparecimento recente de outras espécies de hominínios, à medida que nós, humanos, tomamos mais e mais terras e recursos, é um sinal de quão perigosos somos.

Nos últimos cinquenta anos, os paleontologistas adquiriram muitos novos brinquedos e truques de medicina legal que os ajudaram a preencher mais detalhes da história dos hominínios. Dentes fossilizados são particularmente informativos. Isso é bom, porque dentes são com frequência os únicos restos que encontramos. Assim como o dentista pode dizer se andamos comendo pipoca, chocolate e sorvete, do mesmo modo um bom “dentista” paleontológico pode dizer se nossos ancestrais comiam carne ou vegetais. A forma de um dente pode nos dizer se ele foi usado para cortar ou moer a comida de seu dono, e isso é muito

informativo. Nozes exigem dentes para moer, como os molares, enquanto a carne requer dentes de corte, como os caninos.

Sinais químicos encontrados em ossos e dentes também podem nos dizer muita coisa sobre dietas e hábitos de vida. Por exemplo, os fotossintetizadores  $C_4$ , como gramíneas e ervas fibrosas como a junça, absorvem mais do isótopo de carbono levemente mais pesado, o carbono-13, do que do carbono-12, mais comum. A análise dos dentes do *Australopithecus africanus* de cerca de 2,5 milhões de anos atrás mostra taxas de carbono-13 superiores às esperadas, e, como eles certamente não estavam comendo gramíneas (nenhum símio pode comer gramíneas), isso sugere que eles comiam a carne de *animais* que comiam capim. E o consumo de carne implica que eles eram caçadores ou catadores de carniça, e que talvez usassem ferramentas de pedra.

A análise química dos isótopos de estrôncio nos ossos pode até nos dizer que distâncias esses indivíduos percorriam.<sup>7</sup> Estudos dos ossos de um grupo de hominínios conhecidos como *Australopithecus* mostraram que as fêmeas viajavam mais que os machos, o que sugere que as fêmeas aderiam a grupos de machos, e não o oposto. Em outras palavras, suas comunidades eram patrilocais, como as dos chimpanzés modernos, e isso nos diz muito sobre seu mundo social. Temos assim ferramentas poderosas de investigação. Mas, infelizmente, elas costumam produzir mais perguntas do que respostas, lembrando-nos que a história da evolução humana é realmente muito complexa.

O registro fóssil dos hominínios é muito mais rico do que era. Em 1900, os antropólogos tinham restos fósseis de apenas dois tipos antigos de seres humanos: dos neandertais, o primeiro dos quais foi encontrado na Alemanha em 1848, e do *Homo erectus*, cujos restos foram encontrados pela primeira vez em 1891 em Java pelo paleoantropólogo

holandês Eugène Dubois. Esses achados sugeriram que os seres humanos poderiam ter evoluído na Europa ou na Ásia. Mas, em 1924, Raymond Dart, um professor australiano de anatomia que trabalhava na África do Sul, descobriu o primeiro fóssil de hominínio africano importante. Era um crânio de criança que estava entre uma coleção de outros fósseis, da espécie agora conhecida como *Australopithecus africanus*, parte de um grande grupo de espécies de australopitecos que apareceu pela primeira vez há cerca de 5 milhões de anos. Após essa descoberta, mais e mais fósseis de hominínios começaram a aparecer na África, e a maioria dos paleoantropólogos acredita agora que nossa espécie evoluiu em algum lugar da África. A partir da década de 1930, Louis e Mary Leakey começaram a encontrar fósseis e artefatos de hominínios no Grande Vale da Fenda (Rift Valley), na África oriental, onde o magma que subia do manto terrestre começou a dividir a placa tectônica sobre a qual se encontra a maior parte do continente africano. Em algum momento, um novo mar aparecerá ali. Enquanto isso, rachaduras na placa tectônica africana dão aos caçadores de fósseis vislumbres do passado remoto de nossa espécie.

Em 1974, na Etiópia, Donald Johanson descobriu 40% do esqueleto de outra espécie de australopiteco, o *Australopithecus afarensis*. O esqueleto foi batizado de Lucy e datado de cerca de 3,2 milhões de anos atrás. Outros restos de australopitecos que foram encontrados têm quase 4 milhões de anos de idade. Desde então, encontraram-se em outras partes do continente espécies anteriores de hominínios que datavam de 4 milhões e 5 milhões de anos atrás (*Ardipithecus*) e até 6 milhões de anos atrás (*Orrorin tugenensis*), ou talvez 7 milhões (*Sahelanthropus tchadensis*), data bastante próxima daquela em que se supõe ter vivido o último ancestral comum de todos os hominínios.

Temos tão poucos fósseis dos primeiros hominínios que uma única descoberta nova pode mudar radicalmente a história. Não é sequer certo que os fósseis mais antigos sejam realmente de hominínios, e nem sempre está claro se os restos fósseis pertencem a espécies distintas ou não. O *Homo habilis* e o *Homo erectus*, espécies com tamanhos cerebrais muito diferentes, devem ser atribuídos a gêneros diferentes, ou o *H. habilis* deve ser considerado um australopiteco tardio? Nossa compreensão da história inicial dos hominínios continua incompleta, mas partes da história estão ficando mais claras.

Até mesmo as primeiras espécies de hominínios parecem ter andado sobre duas pernas, pelo menos em parte do tempo. Isso é muito diferente dos chimpanzés e dos gorilas, que andam se apoiando nas juntas. É possível saber a partir dos ossos se uma espécie costuma andar sobre duas pernas. Em espécies bípedes, o dedão do pé não é mais usado para agarrar, então ele se alinha mais aos outros dedos, enquanto a coluna entra no crânio por baixo, não pelas costas (fique de quatro e entenderá por quê). Andar sobre duas pernas exigia rearranjos nas costas, nos quadris e até na caixa craniana. Também favorecia quadris mais estreitos, o que tornava a gravidez mais difícil e perigosa, o que por sua vez significa provavelmente que muitos hominínios, tais como os seres humanos modernos, davam à luz bebês que ainda não eram capazes de sobreviver sozinhos. Isso significaria que seus bebês precisariam de mais cuidados parentais, o que pode ter estimulado a sociabilidade e ter envolvido mais os machos na criação dos filhos. Houve muitos efeitos indiretos do bipedalismo, mas ainda não sabemos exatamente por que os hominínios se tornaram bípedes. Talvez o bipedalismo permitisse que nossos ancestrais caminhassem ou corressem por maiores distâncias nas terras gramadas das savanas que se espalharam pelo mundo mais fresco

dos últimos 30 milhões de anos. A posição ereta também libertou as mãos humanas para se especializarem em tarefas manipulativas, inclusive a fabricação de ferramentas.

Não há sinais de que os primeiros hominínios fossem excepcionalmente inteligentes pelos padrões dos primatas. Seu crânio continha um cérebro muito menor que o nosso e mais parecido com o dos chimpanzés, com um volume de cerca de trezentos a 450 centímetros cúbicos. Nosso cérebro, em comparação, tem em média 1350 centímetros cúbicos. Mais significativo que o tamanho absoluto, embora não seja fácil de calcular, é quanto o tamanho do cérebro se desvia do tamanho esperado de cérebro para um determinado peso corporal dentro de um grupo particular de organismos. Trata-se do cociente de encefalização (EQ). Os chimpanzés têm um EQ de cerca de 2 (em comparação com outros mamíferos), e os seres humanos modernos têm um EQ extraordinariamente alto, em torno de 5,8. Os EQs dos australopitecos variam entre 2,4 e 3,1.<sup>8</sup> Extrema inteligência *não* foi a primeira característica distintiva dos hominínios. O bipedalismo foi.

Os primeiros fósseis atualmente classificados dentro do nosso gênero *Homo* pertencem a uma espécie conhecida como *Homo habilis*, que viveu na África entre 2,5 e 1,5 milhão de anos atrás. O primeiro indício dessa espécie, que consiste apenas em uma mandíbula e alguns ossos da mão, foi encontrado em 1960 por Mary Leakey e seu filho Jonathan, na garganta de Olduvai, no Grande Vale da Fenda. A associação próxima com ferramentas de pedra persuadiu os Leakey a classificar a nova espécie como uma forma de *Homo*, que era uma maneira de os paleontólogos dizerem “acho que se trata realmente de seres humanos porque eles fizeram ferramentas”.

Mas eles eram nós? Esse é o momento em que a história humana começou? Hoje, a maioria dos pesquisadores não crê que exista um gênero *Homo* distinto que incluía tanto nós quanto o *habilis*. Afinal, o cérebro dos *habilis* era apenas ligeiramente maior que o dos australopitecos, variando de 500 a 700 centímetros cúbicos, com um cociente de encefalização de pouco mais de 3. E suas ferramentas de pedra envolviam pouco mais do que quebrar rochas e usar os fragmentos. Uma vez que algumas espécies de australopitecos faziam provavelmente ferramentas de pedra e que os chimpanzés também podem fazer ferramentas (embora não de pedra), parece que o *Homo habilis* era semelhante o suficiente aos australopitecos para ser classificado com eles. O uso de ferramentas não os torna humanos, porque agora sabemos que a fabricação de ferramentas não é exclusiva dos seres humanos.

## HISTÓRIA POSTERIOR DOS HOMINÍNIOS: OS ÚLTIMOS 2 MILHÕES DE ANOS

Há 2 milhões de anos, no início da época do Pleistoceno, encontramos espécies de hominínios que eram maiores, possuíam um cérebro maior, faziam ferramentas de pedra mais sofisticadas e exploravam uma gama maior de ambientes. Provavelmente não é coincidência que eles tenham aparecido quando os climas estavam ficando mais frios e secos. Essas espécies são normalmente classificadas como *Homo erectus* ou *Homo ergaster*, mas aqui eu vou usar *H. erectus* para todo o grupo.

O cérebro grande do *H. erectus* é impressionante porque, como vimos, o cérebro é uma máquina evolutiva dispendiosa. Com efeito, a velocidade do aumento do tamanho do cérebro em relação ao peso corporal nos hominínios foi mais rápida do que a de qualquer outro grupo de espécies na história evolutiva.<sup>9</sup> Talvez a sociabilidade tenha sido o fator determinante. A importância dos cálculos sociais aparece claramente na estrutura do cérebro humano, que dedica um número excepcional de caminhos neuronais aos cálculos sociais. Mais neurônios talvez significassem mais amigos, mais comida, melhor saúde e melhores chances de se reproduzir. O certo é que cérebros maiores possibilitavam que os hominínios vivessem em grupos e redes maiores.<sup>10</sup> A maioria dos primatas, inclusive chimpanzés e babuínos, vivia em grupos de menos de cinquenta indivíduos e, de modo geral, quanto menor o cérebro, menor o grupo. Mas, à medida que o tamanho do cérebro aumentou nos últimos 2 milhões de anos, o tamanho dos grupos de hominínios também cresceu. O *Homo erectus* foi provavelmente a primeira espécie de hominínios a viver em grupos de mais de cinquenta indivíduos.

Os primeiros restos do *H. erectus* foram encontrados em Java, em 1891, por Eugène Dubois. Ele estava pesquisando na Indonésia devido ao seu palpite de que os seres humanos não descendiam de chimpanzés africanos (a aposta de Darwin), mas de orangotangos asiáticos. Seu palpite estava errado. Mas os restos que ele encontrou tinham cérebros com volume de quase 900 centímetros cúbicos, muito mais próximo da média humana moderna de cerca de 1350 centímetros cúbicos. E eles tinham um EQ de 3 a 4. O fato de terem sido encontrados em Java também mostrou que o *H. erectus* tinha as tecnologias e as habilidades necessárias para migrar da África por grande parte do sul da Eurásia. Mas não devemos ficar muito impressionados com isso. Muitas outras espécies, como leões, tigres, elefantes e até mesmo os nossos parentes mais próximos, os orangotangos, haviam feito migrações semelhantes, e isso porque muitos ambientes do sul da Eurásia não são muito diferentes dos ambientes africanos. Com efeito, indícios recentes sugerem que espécies muito próximas do *Homo habilis* podem ter viajado até a Indonésia para se tornarem os ancestrais dos minúsculos hominínios conhecidos como *Homo floresiensis* (ou os Hobbits), que viveram na ilha de Flores há apenas 60 mil anos.<sup>11</sup>

O *H. erectus* era mais alto que o *H. habilis*, sendo alguns tão altos quanto os seres humanos modernos. Ele também fazia ferramentas de pedra mais sofisticadas que as do *H. habilis*. Trata-se das belas e cuidadosamente desenhadas ferramentas de pedra conhecidas como machados acheulianos. Melhores ferramentas de pedra podem ter dado ao *H. erectus* acesso a mais carne, uma fonte crucial de alimento de alta energia para abastecer seu cérebro em expansão. Ele também pode ter aprendido a administrar, controlar e usar o fogo, o que lhe permitiria explorar uma enorme nova fonte de energia. O primatologista Richard

Wrangham sustentou que o *H. erectus* usou fogo para cozinhar (em outras palavras, para pré-digerir e desintoxicar) carnes e outros alimentos. Isso aumentaria a variedade de alimentos que poderia comer, porque muitos alimentos são indigestos ou venenosos antes de serem cozidos. Cozinhar também reduziria o tempo gasto com a mastigação e digestão da comida.

O uso do fogo pode ter tido outras consequências importantes. Por exemplo, cozinhar reduziu o trabalho digestivo exigido do intestino, então o intestino encolheu (e, sim, há indícios fósseis disso), liberando parte da energia metabólica necessária para administrar um cérebro maior. Até agora, essa interessante hipótese não foi comprovada, porque bons indícios do controle sistemático do fogo aparecem apenas há cerca de 800 mil anos e só se tornam bastante comuns há cerca de 400 mil anos.<sup>12</sup> Também sabemos que a tecnologia da pedra do *H. erectus* mudou pouco durante 1 milhão de anos, de modo que ele não parece ter o talento tecnológico e a criatividade de nossa própria espécie.

Nos últimos milhões de anos, a evolução dos hominínios se acelerou. Há cerca de 600 mil anos, novas espécies aparecem no registro fóssil, com cérebros e corpos cada vez mais parecidos com os dos humanos modernos. Não é de surpreender que aparentemente vivessem também em grupos maiores, grupos compostos de até 150 indivíduos, o que parece ter sido o limite máximo entre nossos ancestrais hominínios.<sup>13</sup>

Há debates complexos sobre quantas espécies diferentes de hominínios havia há meio milhão de anos. Sabemos que havia muitas. Mas o mais importante é a tendência mais ampla: os hominínios aparecem na Europa da era do gelo e no norte da Ásia, ambientes que eram muito diferentes da savana africana e que exigiam novas habilidades e tecnologias. Portanto, não surpreende que suas ferramentas

fossem mais sofisticadas, mais variadas e mais especializadas do que as do *H. erectus*. Pela primeira vez, os hominínios puseram pontas de pedra em hastes de madeira. Em Schöningen, na Alemanha, os arqueólogos encontraram lanças de madeira de 400 mil anos, feitas com precisão e delicadeza. Alguns antropólogos chegaram a detectar indícios de atividades artísticas e rituais. Entre os achados de Eugène Dubois estavam conchas de mexilhões decoradas, datadas de 500 mil anos atrás, que se parecem de modo suspeito com formas simples de arte.

Contudo... nada disso era revolucionário. As mudanças realmente espetaculares começaram há apenas 200 mil ou 300 mil anos, após o aparecimento de nossa espécie, o *Homo sapiens*.

## O QUE NOS TORNA DIFERENTES? CRUZANDO O LIMIAR 6

Imaginemos uma equipe de cientistas alienígenas que orbitam em torno do nosso planeta em busca de vida inteligente e estudam as formas de vida da Terra num projeto de pesquisa longitudinal com duração de vários milhões de anos. Há 200 mil anos, eles não teriam notado nada incomum a respeito de nossos ancestrais. Na África e em partes da Europa e da Ásia, podem ter visto várias espécies de primatas grandes e bípedes, entre elas as espécies que chamamos de *Homo neanderthalensis* e *Homo heidelbergensis*. Podem até ter visto indivíduos que um paleontólogo humano moderno descreveria como *Homo sapiens*, porque o crânio mais antigo atribuído à nossa espécie tem quase 200 mil anos de idade. Foi encontrado no vale do rio Omo, na Etiópia, no Grande Vale da Fenda. (Em junho de 2017, restos humanos do Marrocos foram datados de 300 mil anos atrás, mas sua exata relação conosco ainda é incerta.) Mas havia pouca distinção entre esses primeiros seres humanos e muitas outras espécies de primatas e mamíferos de tamanho grande ou médio. Eles viviam em pequenas comunidades nômades espalhadas, com uma população total de, no máximo, algumas centenas de milhares de indivíduos. Como todos os animais de grande porte, eles coletavam ou caçavam em seus arredores a comida e a energia de que necessitavam.

Hoje, 200 mil ou 300 mil anos depois (quase nada de tempo para um paleontólogo), nossos alienígenas em órbita em busca de vida inteligente teriam visto mudanças suficientes no comportamento dessa espécie para justificar altas comemorações acadêmicas. Eles teriam observado os humanos se espalharem pelo mundo. Depois, a partir do final da última era glacial, há 10 mil anos, teriam notado que a quantidade de seres

humanos aumentava rapidamente. Teriam observado também os humanos começarem a mudar seus ambientes para melhor lhes servirem, queimando florestas, desviando rios, arando a terra e construindo vilas e cidades. Nos últimos duzentos anos, o número de seres humanos aumentou para mais de 7 bilhões, e nossa espécie começou a transformar os oceanos, a terra e o ar. Estradas, canais e ferrovias construídas pelo homem serpenteavam através de continentes, ligando milhares de cidades construídas por humanos com populações na casa dos milhões. Navios enormes cruzavam os oceanos e aviões transportavam mercadorias e pessoas pelo ar e pelos continentes. Há apenas cento e poucos anos, em filamentos brilhantes e grandes áreas, a Terra começou a se iluminar à noite. Os instrumentos dos alienígenas também teriam mostrado que os oceanos estavam ficando mais ácidos, a atmosfera ficando mais quente, os recifes de corais estavam morrendo e as calotas polares, encolhendo. A biodiversidade declinava com tanta rapidez que alguns dos biólogos alienígenas poderiam ter se perguntado se isso seria o início de outra extinção em massa.

Do ponto de vista paleontológico, mudanças tão rápidas são o equivalente de uma explosão. Sem termos planejado isso, nos tornamos uma espécie que muda o planeta. Temos até o poder, se formos tolos o suficiente, de destruir grande parte da biosfera em apenas algumas horas, lançando alguns dos 1,8 mil mísseis nucleares que permanecem em alerta máximo atualmente. Nenhuma espécie sozinha teve esse poder na história de 4 bilhões de anos da biosfera.

Claramente, um novo limiar havia sido cruzado. Nossos cientistas alienígenas certamente teriam se perguntado: o que *se passa* com essa estranha espécie?

Historiadores, antropólogos, filósofos e estudiosos de muitos outros campos têm lutado longa e duramente com essa mesma pergunta. Alguns acham que a questão é complexa demais, carregada demais e multidimensional demais para produzir uma resposta científica. Mas, curiosamente, quando vemos a história humana como parte da história maior da biosfera e do universo, as características distintivas de nossa espécie se destacam com mais clareza. Hoje, estudiosos de muitos campos diferentes parecem estar convergindo para respostas semelhantes à questão sobre o que nos torna diferentes.

Quando se veem mudanças repentinas e rápidas como essa, é bom começar a procurar por pequenas alterações que tenham enormes consequências. A teoria da complexidade e o campo relacionado da teoria do caos estão repletos de mudanças como essa. Muitas vezes, elas são descritas como efeitos borboleta. A metáfora vem do meteorologista Edward Lorenz, que destacou que, nos sistemas meteorológicos, eventos minúsculos (o bater das asas de uma borboleta, quem sabe?) podem ser amplificados por ciclos positivos de feedback, gerando uma cascata de mudanças que podem desencadear tornados a milhares de quilômetros de distância. Então, quais são as mudanças minúsculas que desencadearam o tornado da história humana?

Muitas características diferentes compõem o pacote humano, de mãos hábeis a cérebros grandes e sociabilidade. Mas o que nos torna radicalmente diferentes é o nosso controle coletivo de informações sobre nosso entorno. Nós não coletamos apenas informações, como outras espécies. Parece que as *cultivamos* e *domesticamos*, como os agricultores cultivam as plantações. Nós geramos e compartilhamos cada vez mais informações e as usamos para captar fluxos cada vez maiores de energia e recursos. Informações novas deram aos seres humanos lanças e arcos e

flechas aprimorados que lhes permitiram caçar animais maiores com mais segurança. Deram-lhes barcos melhores que lhes deram acesso a novos locais de pesca e novas terras, e ofereceram-lhes novos conhecimentos botânicos que lhes permitiram remover os venenos de plantas potencialmente comestíveis, como a mandioca. Em tempos mais modernos, informações novas estão por trás das tecnologias que nos permitem explorar a energia dos combustíveis fósseis e construir as redes eletrônicas que nos ligam a um único sistema mundial.

O gerenciamento de informações nessa escala não foi conquista de indivíduos. Ele dependia do compartilhamento, do acúmulo de milhões de percepções individuais ao longo de muitas gerações. Por fim, comunidade a comunidade, esse compartilhamento criou o que o geólogo russo Vladímir Vernadski chamou de *noosfera*, um único domínio global da mente, da cultura, de pensamentos e ideias compartilhados. Diz Michael Tomasello:

Existe apenas um mecanismo biológico conhecido que poderia provocar esses tipos de mudanças no comportamento e na cognição em tão pouco tempo. [...] Esse mecanismo biológico é a transmissão social ou cultural, que funciona em escalas de tempo muitas ordens de grandeza mais rápidas do que as da evolução orgânica.

Esse processo, que Tomasello chama de “evolução cultural cumulativa”, é peculiar à nossa espécie.<sup>14</sup>

A mudança minúscula que permitiu que os humanos compartilhassem e acumulassem tanta informação foi linguística. Muitas espécies têm linguagem; pássaros e babuínos podem alertar os outros membros de seu grupo sobre a aproximação de predadores. Mas as linguagens dos animais podem compartilhar apenas as mais simples das ideias, quase todas ligadas ao que está imediatamente presente, um pouco como a mímica (imagine tentar ensinar bioquímica ou produção

de vinho com mímica). Vários pesquisadores tentaram ensinar os chimpanzés a falar e, com efeito, eles são capazes de adquirir e usar vocabulários de cem ou duzentas palavras; são capazes até de ligar pares de palavras em novos padrões. Mas seus vocabulários são pequenos e não usam sintaxe ou gramática, as regras que nos permitem gerar uma enorme variedade de significados a partir de um pequeno número de sinais verbais. A habilidade linguística deles parece nunca superar a de um ser humano de dois ou três anos de idade, e isso não é suficiente para criar o mundo de hoje.

E eis onde a borboleta bateu suas asas. A linguagem humana cruzou um limiar linguístico sutil que possibilitou tipos de comunicação totalmente novos. Acima de tudo, as linguagens humanas nos permitem compartilhar informações sobre entidades abstratas ou sobre coisas ou possibilidades que não estão imediatamente presentes e podem nem mesmo existir fora de nossa imaginação. E nos permitem fazer isso com rapidez e eficiência. Com a exceção parcial das abelhas, cujas danças podem dizer a outras abelhas onde encontrar mel, não conhecemos animais que possam transmitir informações precisas sobre o que não está bem diante deles. Nenhum animal pode trocar histórias sobre o futuro ou o passado, ou avisar sobre a manada de leões vinte quilômetros ao norte, ou falar sobre deuses ou demônios. Eles talvez possam pensar nessas coisas, mas não podem falar sobre elas. E talvez seja por isso que é difícil encontrar qualquer indício de ensino dentro de qualquer outra espécie, mesmo entre nossos parentes mais próximos, os macacos e antropóides.<sup>15</sup>

Essas melhorias linguísticas permitiram que os humanos compartilhassem informações com tanta precisão e clareza que o conhecimento começou a se acumular de geração em geração. As

linguagens animais são muito limitadas e imprecisas para permitir esse tipo de acumulação. Se alguma espécie anterior tivesse essa capacidade, certamente teria deixado vestígios, como expansão e impacto crescente em seu ambiente. Na verdade, veríamos o tipo de indício que encontramos na história humana. A linguagem humana é poderosa o suficiente para agir como uma catraca cultural, prendendo as ideias de uma geração e preservando-as para a próxima geração, que, por sua vez, pode complementá-las.<sup>16</sup> Chamo esse mecanismo de *aprendizado coletivo*. Trata-se de um novo promotor de mudanças, e que pode promovê-las de forma tão poderosa quanto a seleção natural. Mas, como permite trocas instantâneas de informações, funciona muito mais rápido.

Ainda não sabemos com clareza como e por que nossa espécie adquiriu o poder linguístico necessário para desencadear esse novo e poderoso impulsionador de mudanças. Teria sido, como afirmou o neuroantropólogo norte-americano Terrence Deacon, uma nova capacidade de comprimir grandes quantidades de informação em símbolos (palavras enganosamente simples como “símbolo”, que transportam uma enorme carga informativa)? Ou foi a evolução de novos circuitos gramaticais no cérebro humano que nos ajudou a combinar palavras de acordo com regras precisas de modo a transmitir uma grande variedade de significados diferentes, como o linguista Noam Chomsky sugeriu? Trata-se de uma ideia tentadora, porque, como diz Steven Pinker, outro linguista, o truque realmente difícil era “criar um código que pudesse transformar um emaranhado macarrônico de conceitos em um fio linear de palavras” e fazer isso de forma tão eficiente que o ouvinte pudesse recriar rapidamente o espaguete de conceitos a partir do fio linear.<sup>17</sup> A linguagem humana teria sido habilitada pelo

aumento do espaço disponível para pensar num córtex maior, que podia conter pensamentos complexos o bastante para formar frases sintaticamente complexas, ou deixar um indivíduo memorizar o significado de milhares de palavras?<sup>18</sup> Ou as formas melhoradas de linguagem têm suas raízes na sociabilidade e na disposição de colaborar que são particularmente bem desenvolvidas em nossa espécie?<sup>19</sup> Ou quem sabe tenha havido uma sinergia entre todos esses fatores?

O que quer que tenha acontecido, nossa espécie parece ter sido a primeira a cruzar o limiar linguístico além do qual a informação pode se acumular no interior de comunidades e através de gerações. Como um achado de ouro, o aprendizado coletivo desencadeou uma cornucópia de informações sobre plantas e animais, sobre solos, fogo e substâncias químicas, e sobre literatura, arte, religião e os outros seres humanos. Embora algumas informações também se tenham perdido a cada geração, a longo prazo acumularam-se reservas humanas de informação, e essa crescente riqueza de conhecimento conduziria a história humana, dando-nos acesso a fluxos crescentes de energia e aumentando o poder sobre nossos ambientes. Eis como esse mecanismo é descrito por um pioneiro do estudo da memória, o ganhador do prêmio Nobel Eric Kandel:

Embora o tamanho e a estrutura do cérebro humano não tenham mudado desde que o *Homo sapiens* apareceu pela primeira vez na África oriental [...] a capacidade de aprender dos indivíduos humanos e sua memória histórica cresceram ao longo dos séculos através da aprendizagem compartilhada, ou seja, através da transmissão de cultura. A evolução cultural, um modo de adaptação não biológico, atua em paralelo à evolução biológica como meio de transmitir conhecimento do passado e comportamento adaptativo entre gerações. Todas as realizações humanas, desde a Antiguidade até os tempos modernos, são produtos de uma memória compartilhada acumulada ao longo dos séculos.<sup>20</sup>

O grande historiador W. H. McNeill construiu sua clássica história mundial *A ascensão do Ocidente* em torno da mesma ideia: “O principal fator que promove a mudança social historicamente relevante é o contato com estrangeiros que possuem habilidades novas e desconhecidas”.<sup>21</sup>

## A VIDA NO PALEOLÍTICO

A história humana começa, então, com o aprendizado coletivo. Mas quando começou o aprendizado coletivo?

Até mesmo nossos cientistas alienígenas dificilmente notariam o primeiro bruxuleio de aprendizado coletivo enquanto circundavam a Terra há 200 mil anos. Alguma forma de aprendizagem coletiva pode ter estado em ação até mesmo nas comunidades de *H. erectus*, mas suas consequências ainda não eram revolucionárias. Indícios de mudanças tecnológicas mais rápidas começam a aparecer nos registros arqueológicos africanos há pelo menos 300 mil anos, na forma de ferramentas de pedra cada vez mais delicadas, muitas delas com cabo.<sup>22</sup> E não são apenas os *Homo sapiens* que mostram essa criatividade, mas também os neandertais e a espécie de hominínios conhecida como *Homo heidelbergensis*. Todas essas espécies talvez estivessem adquirindo formas aprimoradas de linguagem que as aproximaram tentadoramente do limiar 6. Indícios primitivos de rituais ou atividades simbólicas ou artísticas são particularmente significativos porque sugerem uma capacidade de pensar simbolicamente ou contar histórias sobre seres imaginários, e isso pode indicar a chegada de formas modernas de linguagem.

Talvez houvesse espaço para apenas uma espécie cruzar o limiar da aprendizagem coletiva. Existe um mecanismo evolutivo conhecido como exclusão competitiva que explica por que duas espécies nunca podem compartilhar exatamente o mesmo nicho. Uma delas acabará por expulsar sua rival se puder explorar o nicho com um pouco mais de eficácia. Assim, podemos imaginar várias espécies se aproximando do

limiar evolutivo para o aprendizado coletivo, mas então uma o cruzou e começou a explorar seu ambiente de forma tão eficiente que a quantidade de seus indivíduos se multiplicou e aumentou de forma a deixar de fora seus rivais.<sup>23</sup> Isso talvez ajude a explicar por que nossos parentes hominínios mais próximos, como os neandertais, pereceram e por que nossos parentes sobreviventes mais próximos, os chimpanzés e os gorilas, estão se aproximando da extinção.

Os indícios de mudança tecnológica e cultural de antes de 100 mil anos atrás são nebulosos e difíceis de interpretar. Nossa linhagem começou a se espalhar na África a partir de pelo menos 200 mil anos atrás, o que pode apontar para as vantagens do aprendizado coletivo.<sup>24</sup> Mas, num mundo de comunidades pequenas e dispersas, na maioria pouco maiores do que famílias extensas, a mudança foi lenta, errática e sujeita a fáceis reversões. Grupos inteiros podiam morrer de repente, junto com as tecnologias, histórias e tradições que haviam construído ao longo de muitos séculos. A maior catástrofe desse tipo ocorreu há cerca de 70 mil anos. Indícios genéticos mostram que o número de seres humanos caiu de repente para algumas dezenas de milhares, apenas o suficiente para encher um estádio esportivo de tamanho moderado. Nossa espécie chegou perto da extinção. A catástrofe pode ter sido provocada por uma enorme erupção vulcânica no monte Toba, na Indonésia, que bombeou nuvens de fuligem para a atmosfera, bloqueou a fotossíntese por meses ou anos e colocou em risco muitas espécies de animais de grande porte. Mas depois o número de seres humanos voltou a aumentar, eles se espalharam mais amplamente, e a maquinaria do aprendizado coletivo voltou a funcionar.

Nos últimos 100 mil anos, temos alguns vislumbres de como nossos ancestrais viveram e encontramos indícios mais claros de aprendizado

coletivo. Como todos os grandes animais, nossos ancestrais coletavam recursos naturais ou caçavam em seus arredores. Mas havia uma diferença crucial entre esses animais e os primeiros seres humanos. Enquanto outras espécies caçavam e coletavam usando um repertório de habilidades e informações que mal mudava ao longo de gerações, os humanos exerciam essas atividades com crescente compreensão de seu meio ambiente, pois compartilhavam e acumulavam informações sobre plantas, animais, estações e paisagens. A aprendizagem coletiva significou que, ao longo das gerações, as comunidades humanas caçaram e coletaram com habilidade e eficiência crescentes.

Alguns sítios arqueológicos nos dão vislumbres de como nossos ancestrais viviam na intimidade. Na caverna de Blombos, na costa do oceano Índico na África do Sul, o arqueólogo Christopher Henshilwood e seus colegas escavaram sítios que datam de 90 mil a 60 mil anos atrás. Os habitantes da caverna de Blombos comiam mariscos, peixes e outros animais marinhos, bem como mamíferos e répteis terrestres. Eles cozinhavam em lareiras bem cuidadas.<sup>25</sup> Faziam lâminas de pedra delicadas e pontas de ossos que provavelmente eram presas a cabos de madeira com colas especialmente preparadas. Mas também eram artistas. Arqueólogos encontraram pedras ocre com marcas de arranhões geométricos, que parecem símbolos ou mesmo escrita. Faziam também pigmentos de cores diferentes e contas de cascas de ovos de avestruz. É tentador ver isso como um sinal de que as comunidades de Blombos *valorizavam* o aprendizado coletivo e a preservação e transmissão de informações, e isso certamente significa que elas preservavam e contavam histórias que resumiam o conhecimento de sua comunidade.

É difícil não ver semelhanças com as comunidades coletoras e caçadoras modernas. Se essas semelhanças não nos enganam, podemos imaginar muitos grupos como os da caverna de Blombos com uma grande diversidade de técnicas de coleta e caça desenvolvidas ao longo de muitas gerações. Podemos imaginá-los migrando através de territórios familiares, unidos por laços familiares e línguas e tradições compartilhadas. Com certeza, também dançavam e cantavam, e contavam histórias de origem, e quase certamente tinham o que nós, modernos, poderíamos chamar de religiões.

No sítio do lago Mungo, na Austrália, os indícios de religião são convincentes. Uma cremação e enterro de cerca de 40 mil anos atrás e uma dispersão de outros restos humanos são provas de ricas tradições rituais. Outros indícios encontrados no local nos lembram que as sociedades paleolíticas, tais como as sociedades humanas modernas, passaram por profundas reviravoltas, muitas delas causadas pelas mudanças climáticas imprevisíveis da era glacial mais recente. Houve períodos regulares de aridez desde o momento em que os seres humanos chegaram à região dos lagos de Willandra, há talvez 50 mil anos. Há cerca de 40 mil anos, a aridez aumentou e o sistema lacustre começou a encolher.

Vinte mil anos depois, na fase mais fria da era glacial, havia comunidades vivendo em ambientes semelhantes a tundras nas estepes da moderna Ucrânia. Em locais como Mejritch, as pessoas construía enormes barracas, usando peles esticadas sobre um andaime de ossos de mamute, e as aqueciam com lareiras internas. Elas caçavam mamutes e outros animais de grande porte e armazenavam carne em poços refrigerados para recuperá-la durante os longos e frios invernos. Caçavam animais que tinham peles e usavam objetos semelhantes a

agulhas com cabeças ornamentais esculpidas em osso para costurar roupas quentes. Até trinta pessoas podem ter vivido juntas em Mejritch durante os longos invernos da era do gelo. Existem sítios semelhantes perto de Mejritch. Isso sugere que havia contatos regulares entre grupos vizinhos, o tipo de rede através da qual informações sobre novas tecnologias, mudanças climáticas, movimentos de animais e outros recursos teriam sido trocadas, assim como histórias. As pessoas também teriam se movimentado entre grupos vizinhos.

Os restos deixados pelas comunidades paleolíticas oferecem instantâneos granulados de suas sociedades. Mas cada instantâneo representa todo um mundo cultural, com histórias, lendas, heróis e vilões, conhecimento científico e geográfico, e tradições e rituais que preservavam e transmitiam habilidades antigas. Esse acúmulo de ideias, tradições e informações foi o que possibilitou que nossos ancestrais paleolíticos encontrassem a energia e os recursos de que precisavam para sobreviver, florescer e migrar para cada vez mais longe no mundo cruel da era do gelo.

Hoje, dados obtidos dos chamados testemunhos de gelo (*ice cores*) permitem-nos rastrear mudanças de temperatura global com grande precisão em centenas de milhares de anos. Durante a época do Pleistoceno, que abrange os 2 milhões de anos decorridos desde a evolução do *Homo erectus*, houve muitas eras glaciais. Elas normalmente duravam 100 mil anos ou mais, com períodos, ou interglaciais, quentes mais curtos entre elas. O período em que vivemos agora é um interglacial que começou há 10 mil anos, no início da época do Holoceno. O interglacial anterior ocorreu há cerca de 100 mil anos e pode ter durado 20 mil anos ou mais. Depois que ele terminou, os climas globais tornaram-se continuamente mais frios e secos, embora com

muitas reversões temporárias e variações locais. O período mais frio da última era glacial ocorreu em torno de 22 mil a 18 mil anos atrás.

À medida que os climas esfriavam, áreas ocupadas por centenas ou milhares de anos tinham de ser abandonadas. Lugares do norte da Europa ocupados havia cerca de 40 mil anos ficaram abandonados por milhares de anos. Mesmo nos climas mais quentes do extremo norte da Austrália, as pessoas sobreviveram por um triz.<sup>26</sup> O rio Lawn Hill, no extremo noroeste de Queensland, esculpiu desfiladeiros através de espessas camadas de calcário e proporcionou às populações locais um bom sustento, graças tanto aos peixes quanto aos animais aquáticos e das terras altas circundantes. Mas durante as fases mais frias elas abandonaram inteiramente as terras altas geladas e permaneceram nos ambientes protegidos dos desfiladeiros.

## A COLONIZAÇÃO DA BIOSFERA: MIGRAÇÕES DOS SERES HUMANOS PELO MUNDO

À medida que o conhecimento tecnológico e o ecológico se acumulavam, muitas comunidades mudaram-se para novos ambientes, puxadas ou empurradas pelas mudanças climáticas, por conflitos com seus vizinhos ou, talvez, pela superpopulação. Ao longo de milhares de anos, migrações de pequena escala acabariam por levar nossa espécie, quilômetros por quilômetro, a todos os continentes, exceto a Antártica. Hoje, podemos rastrear essas migrações seguindo a disseminação de vestígios arqueológicos ao redor do mundo e pela comparação dos genes de diferentes populações modernas.<sup>27</sup>

Há 100 mil anos, durante o último interglacial, quase todos os seres humanos viviam na África, embora um número minúsculo tivesse partido para o Oriente Médio. Em locais como as cavernas de Skhul e Qafzeh, no moderno Israel, eles podem ter encontrado e ocasionalmente cruzado com neandertais. (Sabemos disso porque, hoje, a maioria dos humanos que vivem fora da África tem alguns genes neandertais.) Então, à medida que o clima esfriava, nossos ancestrais parecem ter deixado o Oriente Médio para os neandertais, cujo corpo se adaptava melhor a climas mais frios. Eles só voltariam por volta de 60 mil anos atrás. No entanto, alguns seres humanos podem ter viajado para a Ásia central e o sul da Ásia. Uma razão para pensar assim é que os humanos chegaram a Sahul (o continente da era glacial que incluía Austrália, Papua-Nova Guiné e Tasmânia) entre 50 mil e 60 mil anos atrás. Os migrantes que deixaram a África há 60 mil anos teriam de se deslocar com extraordinária rapidez para chegar lá, por isso parece mais provável que

os primeiros australianos tenham chegado de comunidades de havia muito estabelecidas na Ásia.<sup>28</sup> A colonização da Austrália foi um grande evento na história da humanidade. Não sabemos o que impulsionou os primeiros colonos — provavelmente pressão populacional ou conflitos com outras comunidades na parte sul do que é hoje a Indonésia. Mas sabemos que a travessia exigia habilidades avançadas de navegação e a capacidade de se adaptar rapidamente a um conjunto inteiramente novo de plantas e animais. Nenhuma outra espécie fez essa travessia marítima (os dingos chegaram em milênios recentes, quase certamente com ajuda humana).

As primeiras migrações para a Sibéria e para o norte da Europa foram provavelmente sondagens exploratórias de curta duração durante breves períodos de calor. Mas sítios como Mejritch mostram que, há 20 mil anos, nossos ancestrais podiam lidar com ambientes extremamente frios. Alguns podem ter se estabelecido permanentemente na Sibéria há 40 mil anos. Vinte mil anos depois, na fase mais fria da última era glacial, alguns siberianos foram para leste através da ponte terrestre de Beríngia, que era atravessável porque havia tanta água trancada em geleiras polares que os níveis dos oceanos eram mais baixos do que hoje. De Beríngia, os humanos se espalharam pela América, atravessando o Alasca ou viajando em pequenos barcos ao longo da costa noroeste da América do Norte. A partir daí, alguns migraram para a América do Sul, chegando provavelmente até a Terra do Fogo dentro de 2 mil ou 3 mil anos. Atualmente, os vestígios mais antigos da presença humana na América do Norte datam de cerca de 15 mil anos.

No período paleolítico, migrar foi provavelmente a reação mais comum a inovações ou à pressão populacional. Uma gota de emigração significava que cada comunidade humana poderia permanecer com o

mesmo tamanho enquanto nossa espécie se espalhava pelo mundo, e isso significava que as comunidades poderiam preservar muitas de suas regras sociais tradicionais. É por isso que temos poucos indícios de grandes assentamentos paleolíticos, embora haja muitas provas de que o número total de comunidades aumentou, assim como o número total de seres humanos. O antropólogo inglês Robin Dunbar sustenta que 150 pessoas constituem o maior grupo que o cérebro humano normalmente consegue aguentar, então é possível que as comunidades se dividam naturalmente se ficarem maiores. Dunbar argumentou que, ainda hoje, a maioria dos seres humanos está inserida em redes íntimas que não são maiores que 150 pessoas, mesmo que tenham relacionamentos mais fugazes com muitas outras. As comunidades modernas são enormes, mas apenas por causa da criação de novas estruturas sociais especiais para mantê-las unidas.

Quaisquer que sejam as razões, a maioria das comunidades paleolíticas permaneceu pequena o suficiente para se organizar através de noções de família ou parentesco, como a maioria das sociedades modernas de caça e coleta. É por isso que faz sentido pensar nas comunidades paleolíticas como famílias, e não como sociedades. E, se as modernas comunidades de caça e coleta servem de guia, elas provavelmente tinham um entendimento amplo do termo *família* que se estendia para além do mundo dos humanos para incluir outras espécies e até características da paisagem, como montanhas e rios. As sociedades paleolíticas estavam incorporadas em seu entorno, ecológica e culturalmente, de uma maneira que os habitantes urbanos modernos lutam para entender.

## COMPLEXIDADE CRESCENTE NO PALEOLÍTICO

Embora pequenas, as comunidades paleolíticas tinham a manha humana universal de acumular novas ideias, percepções e conhecimentos, e, mesmo que não possamos rastrear suas histórias em detalhes, sabemos que elas exibiam o mesmo dinamismo cultural e tecnológico que as comunidades humanas posteriores tinham, embora em escala menor.

Como os modernos caçadores-coletores, nossos ancestrais paleolíticos tinham certamente um conhecimento íntimo e preciso dos hábitos e padrões de vida dos animais e insetos que caçavam e das plantas que usavam como alimentos, roupas e equipamentos. As redes mais frouxas, através das quais pessoas, histórias, rituais e informações eram trocados, teriam ligado comunidades em grandes áreas. A partir de indícios arqueológicos e antropológicos, podemos concluir que os grupos familiares viviam separados durante a maior parte do tempo, mas se reuniam periodicamente nos equivalentes paleolíticos dos Jogos Olímpicos em locais onde havia comida suficiente para sustentar reuniões temporárias de centenas de indivíduos. Na região do rio Snowy, no sudeste da Austrália, por exemplo, muitos grupos se reuniam quando milhões de mariposas bogong eclodiam, fornecendo o alimento necessário para sustentar as grandes reuniões conhecidas hoje como *corroborees*. Nessas reuniões, trocavam-se histórias rituais e presentes, renovavam-se laços de solidariedade em danças e cerimônias, e parceiros de casamento (ou indivíduos insatisfeitos) passavam de grupo em grupo. No sul da França, há 15 mil anos, havia reuniões semelhantes, quando comunidades humanas seguiam e caçavam manadas de cavalos, cervos e

gado e realizavam rituais periódicos que geraram uma bela arte rupestre. As artes e esculturas produzidas em sítios como as cavernas de Lascaux e o abrigo rochoso La Madeleine na região de Dordogne, bem como as esculturas de pedra ainda mais antigas encontradas em muitas partes da Austrália, são, aos olhos modernos, tão belas e sofisticadas quanto qualquer arte produzida por seres humanos. Elas ajudam a iluminar o rico mundo intelectual e mental de nossos ancestrais paleolíticos.

À medida que as técnicas de caça e coleta se tornavam mais sofisticadas, nossos ancestrais começaram a moldar seus ambientes de novas maneiras. Em algumas partes do mundo, eles mudaram a mistura de espécies circunvizinhas. Os primeiros seres humanos da Austrália encontraram muitas espécies de animais de grande porte, ou megafauna. Alguns eram tão grandes quanto os rinocerontes, elefantes e girafas da África do Sul, a única parte do mundo em que um grande número desses animais grandes ainda sobrevive. Na Austrália, havia cangurus e wombates gigantes e enormes aves que não voavam, como a *Genyornis newtoni*. Então, subitamente, a maior parte da megafauna australiana desapareceu, como acabaria desaparecendo na Sibéria e na América.

Talvez tenham desaparecido porque o clima mudou. Mas haviam sobrevivido às eras glaciais anteriores, por isso não é difícil pensar que os humanos, com seus métodos de caça cada vez mais sofisticados, possam ter acabado com eles. A cronologia apoia essa explicação. Na Austrália, na Sibéria e na América do Norte, a megafauna desapareceu pouco depois da chegada dos seres humanos. Talvez, como o dodô nas Ilhas Maurício, a megafauna não tivesse medo suficiente de nossos ancestrais, ao contrário da megafauna africana, que evoluiu junto com os seres humanos e sabia como éramos perigosos. De qualquer modo, a megafauna, como todos os grandes animais (inclusive os dinossauros), é

particularmente vulnerável a mudanças repentinas. Há muitos exemplos modernos de extinção de megafauna, como o desaparecimento dos grandes pássaros neozelandeses conhecidos como moas, em poucos séculos após a chegada dos humanos. Na Sibéria e na América, temos até provas diretas de locais de matança, por isso sabemos que os humanos caçavam animais enormes como os mamutes.

A remoção da megafauna mudou as paisagens. Os grandes herbívoros eram capazes de comer muitas plantas. Eliminá-los aumentou a frequência de incêndios, já que restos de plantas foram deixados sem uso. Na Austrália, há cerca de 40 mil anos, o número de incêndios aumentou em muitas regiões. Uma grande porcentagem talvez tenha sido iniciada por raios. Mas sabemos que lá, como em muitas outras partes do mundo paleolítico, os seres humanos usavam sistematicamente o fogo para fertilizar a terra. Essa tecnologia é conhecida pelos arqueólogos com o nome de *fire-stick farming*, referência ao tição que os indígenas australianos carregavam para queimar a terra em épocas históricas. O uso sistemático do fogo, não apenas para cozinhar ou proteger-se, mas para transformar o meio ambiente, representa um dos primeiros sinais do crescente poder ecológico de nossa espécie. Se você tivesse as habilidades necessárias para administrar incêndios com segurança, a queima periódica da terra proporcionava muitas vantagens. Queime uma área de pastagem, volte depois de um dia ou dois, e a primeira coisa que encontrará será churrasco de plantas e animais. Espere algumas semanas e verá a terra renascer, pois o fogo espalhou cinzas como fertilizante e acelerou a decomposição de restos de plantas e animais. Gramíneas e outras plantas brotarão e poderão ser colhidas mais cedo. E as novas plantas atrairão herbívoros e pequenos répteis,

tornando a caça mais fácil e produtiva. Em suma, a agricultura com fogo aumenta a produtividade da terra.

Técnicas semelhantes foram usadas em muitas partes do mundo no final do período paleolítico. Embora não fossem estritamente um tipo de agricultura, elas eram uma maneira de aumentar a produção de plantas e animais utilizáveis em uma determinada área de terra. Em outras palavras, constituem uma forma de intensificação. A agricultura com fogo nos dá uma prévia da abundância de alimentos, recursos e energia que seria liberada pela agricultura.

## A PRIMEIRA ERA DA HISTÓRIA HUMANA

À medida que as pessoas compartilhavam informações, ideias e percepções, além de piadas, fofocas e histórias, ao longo de muitas gerações e entre comunidades vizinhas, acumulava-se lentamente, região por região, um corpo de informações que sou tentado a chamar de *científico*. A ciência paleolítica continha conhecimentos sobre recursos utilizáveis, caçados ou colhidos, fosse para comer, fazer roupas ou curar; conhecimentos sobre técnicas, fosse para navegação, caça ou desenterrar raízes; conhecimentos sobre astronomia; e conhecimentos sociais sobre como abordar e falar com idosos ou estranhos e como marcar transições importantes na vida dos indivíduos. Eram conhecimentos valiosos porque necessários para a sobrevivência, de modo que cuidar deles e passá-los adiante era uma questão de grande seriedade. Os conhecimentos eram filtrados por muitas mentes, testados para verificar sua confiabilidade, precisão e utilidade, e finalmente incorporados às histórias das origens que estavam no centro da educação. E esse lento aumento das informações disponíveis e o controle que essas informações acumuladas dava à nossa espécie sobre o mundo natural e sobre os fluxos de energia por toda a biosfera se tornariam o principal motor de mudança na história humana. À medida que os seres humanos se espalhavam, o mesmo acontecia com o conhecimento. Embora o conhecimento ainda fosse compartimentalizado, comunidade por comunidade, podemos imaginar o lento surgimento, pela primeira vez na história do planeta, de uma nova esfera de conhecimento compartilhado, a noosfera.

Durante o período paleolítico, a noosfera expandiu-se pela África, Eurásia, Australásia e depois para a América, à medida que a quantidade de seres humanos aumentava. Quando as comunidades humanas se espalharam dentro da África, suas populações podem ter aumentado para algumas dezenas de milhares, ou mesmo centenas de milhares, embora houvesse certamente flutuações locais na quantidade. E, como vimos, o número de humanos despencou para apenas algumas dezenas de milhares há 70 mil anos. O demógrafo italiano Massimo Livi-Bacci estima que há 30 mil anos talvez houvesse 500 mil seres humanos, e no começo do Holoceno, há apenas 10 mil anos, pode ter havido 5 milhões ou 6 milhões.<sup>29</sup>

Se tomarmos apenas estes dois últimos números, eles sugerem que as populações humanas aumentaram cerca de doze vezes (ou numa média de um quarto de milhão a cada mil anos) nos últimos 20 mil anos do período paleolítico. Na suposição razoável de que cada indivíduo não usasse menos energia do que antes, isso sugere que o consumo total de energia dos humanos também aumentou cerca de doze vezes. O aprendizado coletivo, por mais de 100 mil anos, aumentara significativamente o controle humano sobre os fluxos de energia e recursos em muitas partes diferentes do mundo.

A maioria desses fluxos crescentes de energia sustentou o crescimento populacional. Não se gastou muita energia para aumentar a complexidade no nível local; como vimos, as comunidades humanas permaneceram pequenas e íntimas. No entanto, em termos da espécie, não há dúvida de que a disseminação dos seres humanos pelo mundo representou um aumento da complexidade, porque há 10 mil anos os humanos empregavam uma diversidade muito maior de tecnologias e

informações do que qualquer outra espécie da Terra, e eles as empregaram em grande parte do planeta.

Não temos provas de que mais energia tenha aumentado a riqueza. Alguns caçadores-coletores podem ter vivido muito bem. Com efeito, o antropólogo Marshall Sahlins sustentou que, em alguns ambientes, as comunidades paleolíticas desfrutavam de dietas variadas, altos níveis de saúde e grande quantidade de tempo de lazer, que podiam usar para contar histórias, dormir ou relaxar, e para as maratonas de danças que parece que uniam a maioria das pequenas comunidades.<sup>30</sup> Mas não havia diferenças significativas de riqueza, porque os caçadores-coletores não tinham motivo para acumular bens quando podiam obter de seu entorno a maior parte do que necessitavam. Além disso, quando se está periodicamente viajando, desejam-se apenas os bens materiais mais valiosos e portáteis.

O período mais frio da era glacial mais recente, há pouco mais de 20 mil anos, foi seguido por vários milhares de anos de aquecimento errático, até que, a partir de cerca de 12 mil anos atrás, as temperaturas globais se acomodaram no regime mais quente e estável que dominou a história humana durante a época do Holoceno. No final da última era glacial, nossos cientistas alienígenas já se interessariam muito pelos estranhos eventos em andamento no planeta Terra. À medida que os climas se aqueciam, o comportamento dos humanos se tornava ainda mais notável. De repente (em escala paleontológica), os seres humanos ganharam acesso a fluxos muito maiores de energia através da agricultura, e esses novos fluxos de energia possibilitariam um salto quântico na complexidade, diversidade e tamanho das sociedades humanas.

## 8. Agricultura: limiar 7

*Quando Adão labutava e Eva fiava, quem era então o nobre? Desde o princípio, todos os homens, por natureza, foram criados iguais, e nosso cativo ou servidão veio pela opressão injusta de homens perversos. Pois, se Deus quisesse algum servo desde o começo, ele teria designado quem deveria ser agrilhado e quem deveria ser livre.*

John Ball, sermão pregado durante a revolta dos camponeses ingleses

Nossos ancestrais viveram como caçadores e coletores nos primeiros 200 mil ou mais anos de nossa história. Um fluxo constante de inovações garantiu que eles conseguissem se alimentar com eficiência crescente e numa diversidade cada vez maior de ambientes, até que, há 10 mil anos, no final da última era glacial, os seres humanos estavam vivendo na maior parte do mundo. Nos últimos 10 mil anos, o modo de vida humano transformou-se graças a uma cascata de inovações que chamamos de *agricultura*.

A agricultura foi uma imensa inovação, um pouco como a fotossíntese ou a multicelularidade. Ela pôs a história da humanidade em caminhos novos e mais dinâmicos, ajudando nossos ancestrais a explorar fluxos maiores de recursos e energia que lhes permitiram fazer mais coisas e

criar novas formas de riqueza. Tal como uma corrida do ouro, a abundância de energia geraria um frenesi de mudanças que acabaria por transformar a relação do homem com a biosfera porque, à medida que cresciam, as sociedades agrárias sustentavam populações muito maiores e desenvolviam muito mais partes móveis do que as sociedades de caça e coleta. Mais energia, recursos e pessoas e mais ligações entre comunidades geraram ciclos de feedback positivo que aceleraram as mudanças. Por todos esses motivos, a agricultura é o nosso sétimo limiar de complexidade crescente.

O potencial para inovações transformadoras existia desde que a aprendizagem coletiva decolou, mas esse potencial começou a se concretizar em consequência de três condições Cachinhos Dourados principais: novas tecnologias (e crescente compreensão dos ambientes gerados pela aprendizagem coletiva), aumento da pressão populacional e os climas mais quentes da época do Holoceno.

## O QUE É AGRICULTURA?

À medida que melhoravam a acumulação e a administração de informações sobre seus ambientes, as comunidades humanas coletavam e caçavam com crescente compreensão e habilidade, e aumentava seu impacto sobre as plantas, os animais e as paisagens ao redor. O uso do fogo na agricultura, por exemplo, transformou vastas áreas, ao aumentar a produção de plantas e animais úteis para os seres humanos. Em 1770, quando navegaram para o norte ao longo da costa leste da Austrália, o capitão Cook e sua tripulação não viram o deserto. Eles viram espirais distantes de fumaça causada pelas queimadas, e viram paisagens alteradas pela atividade humana, tais como os jardins campestres de sua pátria inglesa. A megafauna da Austrália desaparecera havia muito tempo. Os eucaliptos amantes do fogo, que agora dominavam tantas paisagens australianas, estavam lá graças a milhares de anos de uso do fogo na agricultura.

Os agricultores, assim como os coletores-caçadores, usavam informações acumuladas ao longo de milhares de anos. Mas usaram-nas de novas maneiras que conduziriam a manipulação humana do meio ambiente a um grau inteiramente novo.

O princípio básico da agricultura é a própria simplicidade. Os agricultores usam seu conhecimento ambiental para aumentar a produção das plantas e dos animais que consideram mais úteis e reduzir a produção daqueles que não conseguem usar. Os agricultores capinavam e regavam a terra para ajudar a cultivar as plantas que queriam, como trigo e arroz, e cercavam os animais que valorizavam, como ovelhas e cabras, mas removiam ervas daninhas e enxotavam ou

matavam animais de que não gostavam, como cobras e ratos. Essas atividades mudaram paisagens inteiras, e plantas e animais reagiram a esses novos ambientes, como reagem a todas as mudanças ambientais, adaptando-se geneticamente, evoluindo. É por isso que novos tipos de plantas e animais começaram a aparecer quando os agricultores alteraram seus arredores. As espécies que floresceram melhor foram aquelas que agradaram aos humanos, porque eram aquelas de que eles cuidavam com mais atenção. Plantas mais nutritivas, como o trigo e o arroz domesticados, evoluíram, assim como animais mais úteis, como cães, cavalos, gado e ovelhas domesticados. Os animais domesticados ajudavam os caçadores, carregavam e transportavam pessoas e bens, ou forneciam lã ou leite. Quando abatidos, forneciam carne, peles, ossos e tendões.

Os agricultores descobriram que transformar o ambiente era um trabalho árduo. Mas, em troca de cortar, arar, capinar, drenar e cercar, eles conseguiam muito mais energia e recursos da terra, dos rios e das florestas que os rodeavam, porque as espécies que valorizavam floresceram espetacularmente. Isso possibilitou que os primeiros agricultores aproveitassem mais a energia fotossintética que flui através da biosfera. É óbvio que o fluxo total de energia fotossintética não aumentou necessariamente. Pode até ter diminuído quando os agricultores removeram plantas de alta produtividade, como as árvores. Mas, para os agricultores, o importante é que agora podiam aproveitar uma parte maior dos fluxos existentes.

A agricultura deu aos agricultores mais do que comida, madeira e fibras. Deu-lhes também acesso indireto a novos fluxos de energia. Por exemplo: os seres humanos não podem comer grama, mas cavalos e bois podem, então os fazendeiros que deixavam cavalos e bois pastando e

depois os usavam para montar ou transportar, ou matá-los e comê-los, estavam utilizando os grandes fluxos de energia fotossintética através das pastagens. Isso faz uma bela diferença. Um ser humano pode produzir, no máximo, em torno de 75 watts de energia, enquanto um cavalo ou um boi podem produzir até dez vezes mais. Toda essa energia extra podia ser usada para arar a terra mais profundamente do que as enxadas de mão, ou para carregar bens ou transportar pessoas. Os agricultores também conseguiam aumentar a produção de plantas e animais que tinham outros usos além de servir de alimento, como linho e algodão, que podiam ser usados para fazer tecidos. Ou podiam plantar árvores e usar a madeira para construir casas, fazendas, celeiros e cercas, ou queimá-las para cozinhar e aquecer suas casas.

Em termos simples, a agricultura era uma fonte de energia e de recursos de uma única espécie muito engenhosa com acesso a uma quantidade crescente de informações sobre como explorar seu ambiente. Através da magia do aprendizado coletivo, os humanos descobriram como aumentar sua parcela da energia e dos recursos que fluíam pela biosfera, desviando uma parte cada vez maior desses fluxos para usos humanos, assim como acabariam por canalizar grandes rios para seus campos e suas cidades.

Para um biólogo, a agricultura parece uma forma de simbiose: uma relação íntima e mutuamente benéfica entre espécies distintas. Os caçadores-coletores usavam e conheciam centenas de espécies diferentes de plantas, animais e insetos, mas os agricultores se concentravam em um pequeno número de espécies preferidas, por isso desenvolveram relações extremamente íntimas com eles. Relações simbióticas intensas costumam levar a mudanças no comportamento e na composição genética de ambas as espécies. As formigas pastoras ou melívoras

modernas “domesticam” os pulgões. Elas protegem os pulgões, fornecem-lhes comida e os ajudam a se reproduzir. Ora, os pulgões mudaram tanto que não podem mais sobreviver sozinhos. Eles pagam por comida e proteção fornecendo às formigas mel quando elas os afagam suavemente. Mais familiar e mais importante para nós é a relação entre abelhas e plantas. As abelhas obtêm o néctar e as flores se reproduzem com mais segurança, porque as abelhas carregam o pólen de flor em flor. Matem-se abelhas demais e a colheita de grãos que alimenta bilhões de seres humanos estará numa encrenca muito séria.

As espécies preferidas às quais os agricultores dispensavam tanto cuidado e trabalho (as domésticas) ganharam pouco em qualidade de vida. Mas se deram bem demograficamente. Sua quantidade aumentou de forma explosiva, enquanto despencava o número de animais selvagens (nos quais os criadores de animais *não* estavam interessados). No ano 2000, a biomassa total de todos os mamíferos terrestres selvagens era cerca de 1/24 da dos mamíferos terrestres domesticados.<sup>1</sup>

A simbiose muda todas as espécies envolvidas, à medida que evoluem juntas. Compare-se uma espiga de milho moderna com o teosinto, seu ancestral selvagem desalinhado. Ou compare-se um carneiro muflão com seu parente moderno e domesticado. O animal domesticado quase parece que evoluiu para agradar aos humanos. É dócil (há quem diga, indelicadamente, que é mais estúpido do que seus primos do campo), produz mais lã do que precisa, sua carne é saborosa para os homens, e ele não é capaz de sobreviver sem proteção humana. Do ponto de vista demográfico, trata-se de uma estratégia evolutiva surpreendentemente bem-sucedida. Hoje, há mais de 1 bilhão de ovelhas domésticas, mas apenas algumas populações remanescentes de muflão.

Os humanos também mudaram, mas de maneiras diferentes. A maioria de seus ajustes foi cultural e não genética. Na verdade, eles mudaram geneticamente em consequência da agricultura. Por exemplo: se você descende de pessoas que outrora pastoreavam gado e consumiam leite de vaca ou de égua, provavelmente será capaz de digerir esse leite mesmo quando adulto, porque pode continuar produzindo lactase, a enzima que digere a lactose (o açúcar do leite). Os caçadores-coletores consumiam apenas leite materno até cerca de quatro anos de idade e, após a infância, não precisavam mais produzir lactase. Mas onde o leite de vaca ou de égua se tornou uma importante fonte de alimento os humanos começaram a produzir lactase na idade adulta, em consequência de uma mutação genética.

Em sua maioria, porém, os seres humanos não se adaptaram às relações simbióticas da agricultura graças a mudanças genéticas, mas a novos comportamentos: inovações tecnológicas, sociais e culturais acumuladas por meio do aprendizado coletivo. Eles desenvolveram novas formas de trabalhar a terra, as florestas e os rios. E, ao fazer isso, tiveram de aprender novas maneiras de colaborar e viver juntos. A mudança cultural acontece com muito mais rapidez do que a mudança genética, e isso explica por que a agricultura transformou a vida humana em poucas gerações.

## A HISTÓRIA E A GEOGRAFIA DA AGRICULTURA PRIMITIVA

Demorou 100 mil ou 200 mil anos para que os humanos adaptassem suas tecnologias de coleta e caça aos diversos ambientes do planeta Terra. A agricultura se espalhou pelo mundo em menos de 10 mil anos, à medida que os agricultores ajustavam seus métodos de cultivo a diferentes espécies, solos e climas. Hoje podemos rastrear a disseminação da agricultura da mesma forma que podemos rastrear a propagação de uma doença de diferentes centros de infecção.

A agricultura não se expandiu de maneira uniforme ou suave. Espalhou-se rapidamente em algumas regiões, devagar em outras e quase nada em outras, e essas diferenças causariam um enorme impacto na geografia da história humana. Quando a agricultura começou, os seres humanos estavam tão dispersos que acontecimentos em uma parte do mundo causavam pouco impacto em outros lugares. Mudanças importantes aconteciam de comunidade a comunidade e se espalhavam inicialmente através de redes locais. Com o passar do tempo, as ideias atravessavam distâncias maiores, mas, até quinhentos anos atrás, havia algumas barreiras fundamentais ao movimento de pessoas, ideias e tecnologias, inclusive da agricultura. O aumento do nível do mar após o fim da última era glacial cortou a ligação entre a Eurásia e a América, e dificilmente havia comunicação entre a Eurásia e a Australásia, ou com as ilhas do Pacífico ocidental, algumas das quais foram colonizadas há 30 mil anos. Com efeito, os humanos viviam então em várias ilhas ou zonas mundiais separadas. Dentro dessas zonas, a história humana se desenrolava quase como se seus habitantes vivessem em planetas diferentes.

A maior e mais antiga zona mundial é a Afro-Eurásia. Foi onde os seres humanos evoluíram, e, porque havia uma ponte de terra entre a África e a Eurásia, ideias, pessoas e bens podiam atravessar grandes distâncias em ondas sucessivas. A segunda zona mundial mais antiga é a Austrália, colonizada há cerca de 60 mil anos. A zona mundial da Australásia esteve conectada à Papua-Nova Guiné e à Tasmânia durante a última era glacial, mas tinha a mais tênue das conexões com a Eurásia. A terceira maior zona mundial, na América, foi colonizada há pelo menos 15 mil anos, mas foi separada da Eurásia quando o estreito de Bering foi inundado, no final da última era glacial. Em milênios recentes, uma quarta zona surgiria no Pacífico. Ilhas ocidentais, como as Salomão, podem ter sido colonizadas há 40 mil anos, mas ilhas mais ao leste e ao sul (como Nova Zelândia, Havaí e ilha de Páscoa) foram colonizadas durante uma notável série de migrações marítimas que começaram há apenas 3,5 mil anos.

A existência de diferentes zonas mundiais montou um fascinante experimento natural porque, ao olharmos para trás, podemos observar como a história humana se desenrolou em diferentes cenários.<sup>2</sup> Havia semelhanças importantes nas histórias das zonas mundiais. Em todos os lugares, o aprendizado coletivo gerou novas tecnologias, relações sociais e tradições culturais. Mas o fez a velocidades variadas, e isso significou que a agricultura evoluiu de maneiras distintas, criando histórias regionais muito diferentes. Essas diferenças foram imensamente importantes quando as zonas do mundo se reconectaram, depois de 1500.

A agricultura apareceu inicialmente na zona mundial afro-eurásiana, e foi de lá que se espalhou com mais alcance e causou o maior impacto. Ela também surgiu bem cedo na Papua-Nova Guiné. Mais tarde, floresceria

na América. Em outros lugares, embora muitas comunidades explorassem algumas formas de cultivo, seu impacto foi menos transformador.

Há 14 mil anos, os caçadores-coletores já se haviam espalhado para todas as diferentes zonas do mundo, e em algumas, em particular na zona mundial afro-eurásiana, começaram a se assentar e reorganizar seus arredores. Cinco mil anos depois, era possível encontrar aldeias agrícolas no ponto de articulação dos continentes africano e eurásiano, ao longo do rio Nilo e no arco de planaltos da costa oriental do Mediterrâneo conhecido como Crescente Fértil. Dois mil anos depois, numa região bem diferente, surgiram aldeias agrícolas nas terras altas da Papua-Nova Guiné. Há 4 mil anos, havia comunidades agrícolas em muitas partes da África e da Europa, em grande parte do sul, do sudeste e do leste da Ásia, e na zona mundial americana. Àquela altura, é provável que a maioria dos seres humanos já dependesse da agricultura, porque ela sustentava populações maiores do que a caça e coleta. Mas grandes regiões do mundo, como a Austrália, o Pacífico e muitas áreas da América e da Afro-Eurásia, ainda eram escassamente habitadas por comunidades pouco desenvolvidas de coletores-caçadores nômades, embora mesmo nessas regiões fosse possível encontrar, às vezes, pequenos passos em direção à agricultura.

A agricultura, ou quase agricultura, evoluiu de forma bastante independente em diferentes partes do mundo. Não foi uma invenção única e isolada. Isso sugere algo muito importante: à medida que as comunidades humanas independentes acumulavam mais conhecimento tecnológico e ecológico, havia uma grande probabilidade, onde quer que estivessem, de que acabariam usando o conhecimento que haviam acumulado como caçadoras-coletoras para desenvolver técnicas

agrícolas. Mas é provável que só fizessem isso se precisassem dos recursos extras que a agricultura podia fornecer, porque, afinal, a agricultura era um trabalho árduo e significava mudar todo o modo de vida de uma comunidade.

## POR QUE OS SERES HUMANOS ADOTARAM A AGRICULTURA? CRUZANDO O LIMIAR 7

No final da última era glacial, duas mudanças mundiais coincidiram para criar um pequeno número de regiões em que a agricultura começou a parecer tentadora. Primeiro, os climas começaram a ficar mais quentes e mais úmidos em todo o globo; segundo, os caçadores-coletores ocupavam agora tanto espaço da Terra que algumas regiões começavam a parecer superpovoadas. Ambas as mudanças empurraram os seres humanos para a agricultura. Uma vez que foram sentidas em algum grau em diferentes regiões de todas as zonas do mundo, essas mudanças ajudam a explicar o estranho fato de a agricultura ter surgido em poucos milhares de anos em partes do mundo que não tinham contato entre si.

Os climas começaram a esquentar erráticamente há cerca de 20 mil anos e, há 13 mil anos, as temperaturas globais médias já eram semelhantes às de hoje. Então, durante a onda de frio conhecida como o período Dryas recente, a temperatura caiu drasticamente por no mínimo mil anos, voltando a subir depois disso. Por cerca de 10 mil anos, os climas têm sido extraordinariamente estáveis. Os climas mais quentes e úmidos e a excepcional estabilidade climática tornaram a agricultura mais viável do que havia sido durante pelo menos 100 mil anos, proporcionando as condições Cachinhos Dourados para toda a era agrária. Gráficos das temperaturas médias mundiais nos últimos 60 mil anos mostram claramente a notável estabilidade climática dos últimos 10 mil anos, ainda que as variações tenham sido maiores longe dos trópicos.

Os climas mais quentes e úmidos do início do Holoceno criaram algumas regiões de vida vegetal abundante e diversificada que formaram

ricos “jardins do éden” para os caçadores-coletores locais. Em algumas dessas regiões, os recursos eram tão abundantes que eles puderam se assentar em comunidades ou aldeias permanentes. Recentemente, casas de pedra circulares de 9 mil anos de idade foram encontradas no arquipélago de Dampier, na costa da Austrália ocidental.<sup>3</sup> Mudanças semelhantes foram estudadas mais de perto no Crescente Fértil, na costa oriental do Mediterrâneo. Ali, a partir de 14 mil anos atrás, comunidades de um povo conhecido por arqueólogos como natufiano começaram a viver em aldeias permanentes com centenas de pessoas. Eles colhiam grãos selvagens usando foices feitas de pederneiras afiadas embutidas na mandíbula de asnos. Mantinham gazelas em currais. E construíam casas e enterravam seus mortos em cemitérios. Ainda não cultivavam — o pólen encontrado nesses sítios pertence a grãos selvagens. Mas eram sedentários e viviam em aldeias. Arqueólogos descrevem essas comunidades como sendo de “caçadores-coletores abastados”.

A pressão populacional também pode ter encorajado os natufianos a se tornarem mais sedentários. Há muitos assentamentos deles, o que sugere que as populações estavam crescendo rapidamente no Crescente Fértil. Isso não surpreende, porque o Crescente Fértil se encontra entre as principais rotas de migração entre a África e a Eurásia, o que pode ter direcionado para lá novos migrantes.

O assentamento incentivou o crescimento populacional de várias maneiras diferentes. Os caçadores-coletores, que estavam bem conscientes de que a terra podia sustentar poucas pessoas, muitas vezes tentavam limitar o crescimento populacional. Porém, nas aldeias, os bebês não precisavam mais ser carregados e, em algum momento, poderiam ser colocados para trabalhar. Isso mudou as atitudes em relação às famílias, aos filhos e aos papéis de gênero. Nas aldeias, ter

muitas crianças proporcionava muita mão de obra para a família, bem como proteção e cuidados para os idosos. É por isso que, na maioria das comunidades sedentárias, esperava-se que as mulheres tivessem o maior número de filhos possível, em parte porque sabiam que talvez metade morreria antes de atingir a idade adulta. Tais atitudes intensificaram as diferenças nos papéis de gênero e asseguraram que a vida da maioria das mulheres viesse a ser dominada pela gestação e criação de filhos durante toda a era agrária da história humana. As mesmas regras explicam por que, dentro de algumas gerações, muitas aldeias de caçadores-coletores abastados enfrentaram o desafio da superpopulação.<sup>4</sup>

À medida que as populações cresciam, os natufianos precisavam extrair mais recursos da terra. Isso significava preparar o solo com mais cuidado e, por fim, significava adotar alguma forma de agricultura. Os natufianos estavam caindo numa cilada. Haviam construído suas primeiras aldeias no que parecia um paraíso ecológico, mas em poucas gerações defrontaram-se com uma nova crise populacional e, como as comunidades vizinhas também cresciam rapidamente, não podiam usar mais terras. Em vez disso, precisavam usar qualquer truque que conhecessem para aumentar a produtividade da terra que já possuíam. Essas pressões os empurraram, provavelmente com relutância, para a vida dura dos agricultores e, quando aprenderam o que significava ser agricultor, esqueceram o que significava caçar e coletar. Como sempre acontece com o aprendizado coletivo, o acúmulo de novos conhecimentos eclipsou conhecimentos e insights antigos. Pressões semelhantes transformaram comunidades de caça e coleta em muitas partes do mundo à medida que as populações cresceram.<sup>5</sup>

Alguns dos melhores indícios da transição da caça e coleta afluente para a agricultura vêm de Abu Hureyra, no norte da moderna Síria,

perto do vale do Eufrates. O sítio arqueológico foi descoberto no início dos anos 1970 e escavado durante apenas duas estações antes de ser inundado pela construção de uma represa. As camadas mais antigas consistiam em um aglomerado de casas redondas típicas de caçadores-coletores natufianos e datavam de cerca de treze milênios. Seus habitantes caçavam gazelas e jumentos selvagens e coletavam uma grande variedade de alimentos, como nozes, frutas e grãos silvestres. Quando o clima se deteriorou, durante a onda de frio de mil anos do Dryas recente, os frutos de clima quente desapareceram e os aldeões começaram a depender de grãos mais resistentes, embora fossem mais difíceis de coletar e processar. Por fim, passaram a depender de variedades domesticadas de centeio adaptado ao frio; desse modo, pelo menos em Abu Hureyra, parece ter sido a mudança climática que transformou os caçadores em agricultores. Perto do final do período de frio, o local foi abandonado por muitos séculos; foi reocupado quase 11 mil anos atrás. Dessa vez, apareceu uma aldeia substancial, com centenas de casas de tijolos de barro retangulares e vários milhares de habitantes que cultivavam grãos domesticados e caçavam gazelas e ovelhas selvagens. Então, de modo bastante rápido, o número de ossos de ovelhas aumentou, um sinal claro de que elas estavam agora totalmente domesticadas. Os vestígios humanos revelam como a vida podia ser dura para os primeiros agricultores. Todos têm dentes muito desgastados por uma dieta dominada por grãos, embora o desgaste dentário diminua com o surgimento da cerâmica, que tornou possível transformar grãos em mingau. Os ossos das mulheres mostram clara evidência de desgaste devido às longas horas que ficavam oscilando sobre os joelhos enquanto moíam grãos.<sup>6</sup>

Podemos ter bastante certeza de que os primeiros agricultores começaram a cultivar a terra com relutância porque os padrões de vida parecem ter declinado nas primeiras aldeias agrárias. Os esqueletos encontrados nas mais antigas aldeias agrícolas do Crescente Fértil são geralmente mais curtos do que os dos caçadores-coletores vizinhos, o que sugere que suas dietas eram menos variadas. Embora os agricultores fossem capazes de produzir mais alimentos, eles também tinham maior probabilidade de passar fome, porque, ao contrário dos caçadores, dependiam de um pequeno número de culturas básicas e, se as colheitas fracassassem, estavam em sérios apuros. Os ossos dos primeiros agricultores mostram indícios de deficiências vitamínicas, provavelmente causadas por períodos regulares de fome entre as colheitas. Mostram também sinais de estresse, talvez associados ao trabalho intensivo necessário para arar, colher, derrubar árvores, manter casas e cercas, e moer os grãos. As aldeias também produziam lixo, que atraía vermes, e suas populações eram grandes o suficiente para espalhar doenças que não teriam sobrevivido em comunidades de caça e coleta menores e mais nômades. Todos esses indícios do declínio da saúde sugerem que os primeiros agricultores foram empurrados para o complexo e cada vez mais interconectado modo de vida agrário, em vez de atraídos por suas vantagens.

Como eles conheciam o modo de obter mais colheitas da mesma quantidade de terra? Como, na realidade, eles sabiam cultivar? É nesse ponto que o poder da aprendizagem coletiva é mais visível. A maioria das outras espécies confrontadas com crises ecológicas semelhantes teria batido num limite demográfico intransponível. Esse limite explica a conhecida curva em forma de S do crescimento populacional na maioria dos tipos de organismos: uma nova espécie se multiplica até extrair toda

a energia alimentar em seu nicho, e então os indivíduos morrem de fome, a fertilidade diminui e o crescimento populacional estanca. Os seres humanos tinham mais opções porque tinham mais informações. Grande parte dessas informações não fora necessária até então. Era um conhecimento potencial, como a energia potencial — conhecimento mantido em reserva que poderia ser ativado se e quando fosse necessário. Os caçadores-coletores modernos têm muito conhecimento potencial que pode ser ativado numa crise, e os natufianos certamente tinham formas semelhantes de conhecimento. Eles sabiam que as plantas de que gostavam cresciam melhor se fossem irrigadas e se fossem removidas as ervas daninhas pela capina. Na Austrália, em séculos recentes, as comunidades de caçadores-coletores introduziram tecnologias mais intensivas, tais como colher grãos (usando foices feitas de lâminas de pedra com alças cobertas de pelo, no norte da Austrália), moer sementes ou criar enguias em sistemas de pequenos canais especialmente construídos para isso.<sup>7</sup> Mas, na maior parte do tempo, os caçadores-coletores não se importam com essas tecnologias, porque não são necessárias e exigem muito trabalho extra. Em regiões como o Crescente Fértil, as mudanças climáticas e demográficas do início do Holoceno proporcionaram tanto a oportunidade quanto a motivação para usar essas tecnologias de reserva, e usá-las mais ou menos continuamente. Foi isso que transformou caçadores-coletores em agricultores.

Em suma, climas mais quentes tornaram a vida em aldeia e a agricultura possíveis em algumas regiões favorecidas, às vezes a pressão populacional a tornou necessária, e o conhecimento de reserva acumulado pelos caçadores-coletores ao longo de muitos milênios forneceu as tecnologias iniciais para os primeiros agricultores.

A geografia da agricultura primitiva foi moldada pelo acaso das placas tectônicas e pelos tipos de plantas e animais que haviam evoluído em determinadas regiões. Alguns animais e plantas podiam ser domesticados facilmente. Outros não. Os caçadores-coletores foram atraídos por regiões como o Crescente Fértil, áreas que tinham plantas e animais que estavam prontos para a domesticação.<sup>8</sup> Eles certamente testaram muitas espécies diferentes para domesticar. Entre as plantas mais atraentes estavam aquelas que acumulavam ricos estoques de nutrientes para suas sementes, como as árvores frutíferas. Melhores ainda eram as plantas sazonais com tubérculos ou sementes gordas que armazenavam glicose nutritivas para ajudar os humanos a sobreviverem aos períodos de seca. O trigo e o arroz, se colhidos no auge, forneciam fontes de nutrição tão concentradas que valiam o enorme esforço necessário para plantar, proteger, regar, colher e armazenar.<sup>9</sup>

Os animais também variavam em utilidade. As zebras eram demasiado geniosas para serem domadas. Leões e tigres eram perigosos demais e não eram muito saborosos. Mas animais de rebanho como cabras, gado e cavalos eram mais fáceis de controlar, especialmente se os humanos conseguissem assumir o papel de líder do rebanho. Se os animais fossem comedores de capim, poderiam transformar capim em carne, leite, fibras e energia, permitindo que os humanos explorassem as vastas pradarias do mundo. E a carne deles era geralmente saborosa e nutritiva. Mas, quando a agricultura começou a se disseminar, só se encontravam grandes herbívoros domesticáveis na Afro-Eurásia. Como vimos, a maior parte da megafauna (com a exceção parcial dos camelídeos sul-americanos, como as lhamas) foi levada à extinção na Australásia e na América, provavelmente logo após a chegada dos humanos. Isso talvez ajude a explicar por que a agricultura floresceu mais cedo e se espalhou

mais amplamente na zona afro-eurasiana do que nas outras zonas do mundo.

## A PRIMEIRA ERA AGRÁRIA: A AGRICULTURA SE ESPALHA PELO MUNDO

Depois de aparecerem em várias zonas centrais, as aldeias agrícolas se multiplicaram e se espalharam, à medida que os agricultores aperfeiçoavam suas habilidades, aprendiam novas maneiras de aumentar a produção e levavam a agricultura para novas regiões.

Os principais rios que haviam criado solos aluviais férteis ao longo de milhares de anos, como o Tigre e o Eufrates, na Mesopotâmia, o Amarelo (Huang He) e o Yangtzé, na China, e o Indo e o Ganges, no subcontinente indiano, atraíram um número crescente de agricultores. Há talvez 11 mil anos, surgiram aldeias agrícolas no Crescente Fértil e na bacia do Nilo, e depois, dentro de um ou dois milênios, ao longo dos rios Yangtzé e Amarelo. Por volta de 6 mil ou 7 mil anos atrás, já havia cultivo do taro (tubérculo semelhante ao inhame) nas terras altas da Papua-Nova Guiné. Entre 5 mil e 4 mil anos atrás, encontravam-se aldeias agrícolas no vale do Indo e na África ocidental. Já então havia agricultores também na zona do mundo americano: ao longo do rio Mississippi, em partes do México moderno e da América Central, e nos Andes, cujas montanhas proporcionavam ambientes diversificados e uma ampla gama de vegetais potencialmente domésticos.

Não havia nada de automático na disseminação da agricultura a partir das regiões centrais em que ocorreu pela primeira vez. Por exemplo, ela não se espalhou das terras altas da Papua-Nova Guiné para as planícies costeiras, onde as culturas das terras altas, como taro e inhame, também não floresceram.

Quando a pressão populacional levou os migrantes a novos ambientes, eles tiveram que adaptar suas técnicas agrícolas e, às vezes, precisaram

esperar até que seus vegetais domesticados tivessem desenvolvido novas variedades. Do Crescente Fértil, a agricultura se estendeu à Ásia central, à Turquia e depois aos Bálcãs, à Europa oriental e à Europa ocidental, entre 8 mil e 4 mil anos atrás. Quando a agricultura se espalhou pelas regiões mais frias e cheias de florestas da Europa, com seus diferentes solos, estações de cultivo e pragas, os agricultores e suas plantações precisaram se adaptar. No centro e no norte da Europa, eles desenvolveram novas variedades de grãos. Nas regiões cobertas de florestas, adotaram a agricultura de corte e queima (queimadas) itinerante, uma espécie de agricultura nômade. Os agricultores queimavam e cortavam árvores, depois cultivavam o solo coberto de cinzas entre troncos de árvores. Depois de alguns anos, quando o solo perdia a fertilidade, seguiam adiante. No vale do Indo, a agricultura floresceu há 4 mil anos, recuou, depois avançou novamente, recomeçando há cerca de 3 mil anos, nas margens dos rios Indo e Ganges e em outras partes do subcontinente indiano. Na África, pastores de gado floresceram no Saara (que era mais úmido e mais produtivo do que hoje) há 5 mil anos e talvez muito antes. Há 3 mil anos, a agricultura já estava bem enraizada na África ocidental. De lá, espalhou-se para a África central e meridional. Na América, os agricultores também precisaram se adaptar às novas condições; por exemplo, variedades distintas de milho evoluíram na Mesoamérica e ao longo do rio Mississippi.

Com a multiplicação das comunidades agrícolas, o ritmo da mudança se acelerou, porque a agricultura e as muitas mudanças trazidas por ela se espalhavam com mais rapidez do que a caça e a coleta. O motivo do crescimento tão rápido da agricultura não é imediatamente óbvio, porque a vida agrícola podia ser difícil, e é por isso que os caçadores-coletores sobreviveram, muitas vezes ao lado dos agricultores, por

muitos milênios. Em algumas regiões, como a Sibéria e a Austrália, as desvantagens da agricultura superavam as vantagens, e os caçadores-coletores floresceram até os tempos modernos. No entanto, em regiões adequadas para a agricultura, nas que *poderiam* tornar-se adequadas para a agricultura, ou naquelas em que o rápido crescimento populacional pressionava fortemente os recursos disponíveis, as comunidades agrícolas apresentavam muitas vantagens em relação a seus vizinhos caçadores-coletores. Até mesmo a agricultura de corte e queima podia sustentar cerca de vinte a trinta pessoas por quilômetro quadrado. Isso era cerca de cem vezes mais do que as densidades populacionais típicas de caçadores-coletores em ambientes semelhantes.<sup>10</sup> Na hora do aperto, isso significava que as comunidades agrícolas eram geralmente capazes de mobilizar mais pessoas e recursos do que os caçadores-coletores. Elas poderiam inundá-los demograficamente e, se necessário, derrotá-los militarmente. É por isso que, talvez há 5 mil anos, a maioria dos seres humanos já dependia da agricultura, e as comunidades agrícolas, e aquelas que elas sustentavam, começavam a dominar a história da humanidade.

À medida que se espalhavam, os agricultores transformavam seu ambiente. Em todos os lugares, eles cortavam florestas, construíam aldeias, aravam a terra, expulsavam pragas e arrancavam ervas daninhas. Por sua própria natureza, a agricultura exigia uma atitude manipuladora em relação ao meio ambiente. Enquanto os caçadores-coletores costumavam considerar-se inseridos na biosfera, os agricultores viam o ambiente como algo a ser administrado, cultivado, explorado, melhorado e até conquistado. E, enquanto o aprendizado coletivo proporcionava aos agricultores o conhecimento necessário para manipular seus ambientes, a agricultura lhes dava os fluxos de alimentos

e energia de que precisavam para se multiplicar e para transformar áreas cada vez maiores de território, com poder e habilidade crescentes.

Aprendizagem coletiva e novos fluxos de energia: eis o que impulsionou o turbulento dinamismo histórico da era agrária e levou a uma mutabilidade disruptiva que não houvera no Paleolítico.

## COMO A AGRICULTURA TRANSFORMOU A HISTÓRIA HUMANA

Durante talvez 5 mil anos após o fim da última era glacial, a era agrária da história da humanidade foi dominada por aldeias agrícolas. Eram as megalópoles daquela época, as comunidades mais complexas, populosas e poderosas da Terra. À medida que a agricultura se espalhava e as populações aumentavam, as aldeias se multiplicavam até se tornarem as comunidades em que a maioria dos seres humanos vivia. Se você fosse humano na era agrária, seria provavelmente um agricultor ou viveria numa comunidade de agricultores.

Essas comunidades densas eram um fenômeno novo na história da humanidade. Pelos padrões modernos, as aldeias agrícolas podem parecer simples. Mas, pelos padrões paleolíticos, eram mastodontes sociais, políticos e culturais. Elas exigiam não somente novas tecnologias, mas também novas regras sociais e éticas, novas ideias sobre como viver junto, como evitar conflitos e como dividir a riqueza da comunidade. Se o antropólogo e psicólogo evolucionista britânico Robin Dunbar está certo ao dizer que a evolução equipou o cérebro humano para lidar com grupos de não mais de 150 indivíduos, conclui-se que comunidades muito maiores do que isso precisariam de novas tecnologias sociais para mantê-las juntas.

Durante a primeira metade da era agrária da história humana, a maioria das aldeias agrícolas era composta de comunidades independentes, com vínculos limitados com as aldeias vizinhas, e pequenas o suficiente para serem mantidas juntas por meio de regras tradicionais de parentesco. Embora as trocas de pessoas, bens e ideias entre aldeias fossem cada vez mais importantes, ainda não havia Estados,

impérios, cidades ou exércitos. As enormes e complexas sociedades que dominaram os últimos 5 mil anos da história humana surgiram somente depois que a agricultura se espalhou o suficiente para criar uma massa crítica de pessoas, recursos e novas tecnologias. Mas as raízes das civilizações agrárias encontram-se nas comunidades das aldeias dos primeiros tempos agrários.

Já vimos que as sociedades de caça e coleta continham reservas de conhecimentos potenciais de muitos tipos diferentes, inclusive informações sobre como administrar grandes grupos de pessoas. O *potencial* para aumentar a complexidade social, para redes políticas, econômicas e militares de grande escala e para as imensas construções que encontramos em todas as civilizações agrárias já estava presente nas comunidades de caça e coleta e nas primeiras comunidades agrícolas.

O sítio arqueológico de Göbekli Tepe (Monte da Barriga, em turco), no sul da Anatólia, oferece uma ilustração espetacular do potencial intelectual e tecnológico à espreita dentro das primeiras comunidades de caça e coleta e agricultura. O local foi ocupado pela primeira vez durante a época das vilas natufianas e, depois, periodicamente, entre 12 mil e 9 mil anos atrás.<sup>11</sup> O sítio contém vinte círculos de pedra com cerca de duzentos pilares de pedra lindamente esculpidos, alguns deles com mais de cinco metros de altura e que pesam até vinte toneladas. Muitos têm estranhas imagens em baixo-relevo de aves ou animais com garras ou bico. Não há construções domésticas e, curiosamente, muitos dos pilares foram ritualmente enterrados. Os arqueólogos também encontraram indícios de fabricação de cerveja no local, o que também pode apontar para atividades rituais (bem como bacanais). Isso sugere que Göbekli Tepe, como Stonehenge na Inglaterra ou Chaco Canyon no Novo México, era um centro ritual para as comunidades vizinhas, talvez um

equivalente primitivo dos Jogos Olímpicos ou das Nações Unidas. Pode também ter funcionado como um observatório. O enorme esforço empregado na construção dos círculos de pedras de Göbekli Tepe sugere a importância das ligações diplomáticas e tecnológicas entre diferentes comunidades numa era de rápido crescimento populacional. O tamanho dos pilares, a precisão e a beleza da escultura e o fato de que centenas de pessoas devem ter sido empregadas para esculpir e mover os grandes blocos de pedra apontam para uma nova escala e complexidade da organização social. Isso é surpreendente, porque é provável que aqueles que construíram as mais antigas dessas estruturas ainda não fossem agricultores verdadeiros, mas eram, como os natufianos, caçadores-coletores sedentários ou afluentes.

O crescimento das aldeias e redes de aldeias fez com que as regras tradicionais de parentesco fossem contestadas.<sup>12</sup> À medida que as primeiras aldeias agrícolas se expandiam, construíam novas ligações com vizinhos e, por vezes, se transformavam em pequenas cidades, as regras de parentesco e família tinham de ser modificadas ou suplementadas com novas regras sobre propriedade, direitos, posição social e poder. Os módulos sociais tradicionais de uma ou duas centenas de pessoas precisavam conectar-se a redes maiores que eram inevitavelmente hierárquicas. Em todos os lugares, à medida que a agricultura se expandia, surgiam estruturas novas e mais hierárquicas que recobriam as comunidades das aldeias organizadas por regras tradicionais de parentesco.

Uma maneira de retratar relações e posições numa aldeia de mil pessoas é usar as regras tradicionais de parentesco, mas projetá-las no passado. Eis como isso pode ter funcionado: se seus pais, avós e bisavós eram descendentes dos filhos mais velhos em cada geração, então você

poderia reivindicar a primazia de filho mais velho para si mesmo e toda a sua família. Mecanismos como esse tornaram possível classificar famílias inteiras e linhagens por primazia. Vemos aqui o começo das classes e castas. Mas o talento também importava. Como as pessoas viviam mais próximas nas grandes aldeias, as disputas aumentavam em relação aos direitos à terra, herança, assaltos ou danos à propriedade, como as colisões entre prótons nos aglomerados de matéria que formaram as primeiras estrelas. Mas resolver disputas numa grande aldeia era muito diferente de resolver uma briga de família. Os mediadores ou juízes precisavam de delicadeza, tato, inteligência e experiência. E, às vezes, precisavam ser capazes de impor sua vontade pela força.

Estudos modernos de sociedades aldeãs de pequena escala mostram como tais problemas podem gerar formas simples de liderança, pois um modesto grau de autoridade sobre os outros aldeões é concedido a indivíduos que são particularmente generosos ou fortes, particularmente versados nas tradições e na lei, particularmente piedosos, ou particularmente habilidosos em batalha. Se eles são social e politicamente hábeis, podem tornar-se “grandes homens”, líderes conhecidos por sua generosidade, suas habilidades de liderança e organização. As posições sociais baseadas em linhagem ou capacidade estabeleceram as bases para as divisões por classe e casta. Os delineamentos do poder imperial já estavam prefigurados nas festas e lutas das aldeias antigas.

Com mais pessoas e mais trocas, a maquinaria do aprendizado coletivo operava com sinergia e poder crescentes. Muitas inovações ofereciam melhorias graduais para a agricultura em diferentes áreas, e algumas inovações mudavam o jogo. Duas inovações especialmente

importantes foram a domesticação de grandes animais e o surgimento da irrigação em grande escala.

Os animais foram provavelmente domesticados ao mesmo tempo em que as primeiras plantas. Os cães podem até ter sido domesticados em sociedades de caça e coleta e usados para ajudar na caça, como guardas, ou mesmo para manter as pessoas aquecidas durante o inverno. Mas, de início, a domesticação animal foi ineficiente. Os animais eram mantidos confinados e alimentados, a um custo considerável, até serem abatidos para fornecer carne, couro, ossos e tendões. Há 6 mil ou 7 mil anos, particularmente em regiões com vastas áreas de pastagens que poderiam sustentar grandes rebanhos de gado, fazendeiros e pastores desenvolveram formas de explorar animais domesticados antes de matá-los. Começaram por ordenhar vacas, éguas, cabras e ovelhas; tosavam ovelhas e cabras; e montavam cavalos ou os amarravam em carroças. O arqueólogo Andrew Sherratt descreveu essas novas técnicas como uma “revolução dos produtos secundários” porque os humanos haviam aprendido a usar tanto os produtos primários dos animais domesticados (os recursos que produziam quando mortos) quanto seus produtos secundários (a energia e os recursos que podiam fornecer enquanto vivos). Até os tempos modernos, essas poderosas tecnologias estavam limitadas à zona mundial afro-eurásiana, porque na América o abate de muitas espécies da megafauna deixava muito poucos animais domésticos em potencial. Em algumas regiões da Afro-Eurásia, como a Ásia central, o Oriente Médio e o norte da África, os ganhos em produtividade de produtos secundários foram tão grandes que comunidades inteiras passaram a viver de seus rebanhos, seguindo-os de pastagem em pastagem, morando em tendas e retornando a um estilo de vida nômade. Chamamos essas pessoas de *pastores nômades*. A mobilidade fazia deles

conectores perfeitos entre regiões distantes, e, com o tempo, eles carregaram ideias, tecnologias, pessoas, bens e até doenças por toda a Afro-Eurásia, através das chamadas rotas da seda.

A irrigação em grande escala foi igualmente transformadora. Na Mesopotâmia, a pressão populacional levou cada vez mais agricultores das terras altas bem irrigadas do Crescente Fértil para as áridas terras do sul, no coração do Iraque moderno, por onde corriam os dois grandes rios da região, o Tigre e o Eufrates. Ali, havia tão pouca chuva que, se alguém quisesse plantar, precisaria desviar água dos rios. No início, os agricultores usavam valas simples que eles mesmos cavavam. Mas, com o tempo, comunidades inteiras passaram a colaborar para construir e manter sistemas sofisticados de canais e diques. O maior desses sistemas exigiu milhares de trabalhadores e muita liderança e coordenação. Mas a recompensa era enorme em uma região cujos solos haviam sido enriquecidos durante milênios por inundações dos principais rios. A agricultura avançou aos trancos e barrancos em regiões adequadas para a irrigação, como o norte da Índia, a China, o sudeste da Ásia e, por fim, algumas regiões da América. A agricultura de irrigação sustentava populações maiores, mas também exigia o aumento da cooperação social, de modo que tendia a vincular aldeias agrícolas a redes sociais e políticas maiores.

As populações aumentaram rapidamente à medida que os métodos de cultivo melhoravam e a agricultura se expandia. Demorara pelo menos 100 mil anos para que as populações humanas chegassem a 5 milhões, no final da última era glacial. Há 5 mil anos, a quantidade de seres humanos já havia quadruplicado, chegando perto de 20 milhões. Há 2 mil anos, já havia 200 milhões de homens, quarenta vezes mais do que no final da última era glacial.

Mas o crescimento populacional nunca foi estável. Em todos os lugares, foi interrompido por catástrofes. Doença, fome, guerra e morte — os Quatro Cavaleiros do Apocalipse — floresceram na era agrária. Como mencionado anteriormente, ao contrário dos acampamentos nômades, as aldeias acumulavam lixo e atraíam vermes, facilitando a disseminação de doenças. Onde apareciam doenças novas — infecções para as quais as pessoas não tinham imunidade, como a varíola —, não era incomum que metade da população morresse. Os agricultores também eram mais vulneráveis à fome do que os caçadores-coletores, porque dependiam de muito poucas colheitas. Quando a comida começava a esgotar-se, ervas daninhas, bolotas e cascas de árvores só podiam sustentar as pessoas por um tempo, e os muito jovens e muito idosos sofriam mais e morriam primeiro. Com o crescimento das populações, aldeias lutavam por terra, água e outros recursos. Suas batalhas convocavam o Terceiro Cavaleiro, a guerra, que podia ser ainda mais desastrosa do que a doença e a fome e, muitas vezes, trabalhava ao lado delas. Os seres humanos sempre lutaram, mas nas sociedades agrícolas mais pessoas estavam envolvidas, e as armas se tornaram mais letais quando os combatentes passaram a usar lanças de metal, carros de combate e máquinas de assédio. O Quarto Cavaleiro, a morte, cavalgava atrás dos outros três.

Para melhor ou pior, a história humana entrou numa era mais dinâmica, na qual a mudança era a constante. À medida que cresciam em quantidade, tamanho e complexidade, as comunidades humanas lançavam as bases para as civilizações agrárias que dominaram os últimos 5 mil anos da história humana.

## 9. Civilizações agrárias

*Naquele tempo, as moradas de Acádia estavam cheias de ouro,  
suas casas resplandecentes estavam cheias de prata,  
para seus celeiros vinham cobre, estanho, lajes de lápis-lazúli,  
seus silos transbordavam [...]*

*Seus cais, onde os barcos atracavam, eram uma azáfama só [...].  
Suas muralhas erguiam-se ao céu como uma montanha [...]*

*Os portões — como o Tigre esvaziando sua água no mar,  
a sagrada Inanna abria seus portões.*

Poema sumério, traduzido para o inglês por S. N. Kramer

As aldeias agrícolas e suas populações forneceram a maior parte dos recursos humanos e materiais para as civilizações agrárias que dominaram os últimos 5 mil anos da história humana. Se olharmos para trás dos exércitos e cidades imperiais, dos templos e pirâmides, das caravanas comerciais e das frotas de navegação, da literatura e da arte, das filosofias e religiões das civilizações agrárias, encontraremos, no fundo, muitas vezes longe das áreas centrais, milhares de comunidades agrícolas, bem como uma grande e ainda mais pobre população de errantes e despossuídos, muitos dos quais eram escravos. As pessoas dessas subclasses produziam a maior parte dos grãos e das carnes, muito dos linhos e sedas, e forneciam grande parte da mão de obra (tanto livre

quanto escrava) necessária para as grandes cidades. Seus produtos e seu trabalho pagavam pelas estradas, palácios e templos, sedas, vinhos e joias dos ricos, enquanto seus homens e cavalos serviam nos exércitos. As civilizações agrárias mobilizaram a riqueza humana e material e a energia produzida pelas aldeias agrícolas para construir estruturas sociais muito mais impressionantes e complexas do que quaisquer comunidades humanas anteriores. Assim como todos os organismos vivos, elas também reuniam informações, porque mais informações lhes davam acesso a mais energia e mais recursos.

O surgimento das civilizações agrárias representa outro limiar da complexidade crescente. No entanto, as civilizações agrárias foram construídas sobre alicerces criados pela evolução das comunidades agrícolas ao longo de vários milênios, por isso não vamos tratar seu surgimento como um limiar inteiramente novo, mas como uma segunda fase do limiar que nos deu a agricultura.

Para entendermos o surgimento de civilizações agrárias, não enfocaremos as histórias de determinadas civilizações, mas as questões que colocamos ao longo de nossa história moderna das origens: quais foram as condições Cachingos Dourados para essa nova forma de complexidade? Quais foram os novos atributos emergentes das civilizações agrárias? E quais foram os fluxos de energia que sustentaram esses novos atributos?

## EXCEDENTES, HIERARQUIAS E UMA DIVISÃO DO TRABALHO

Apesar de fomes, doenças e guerras, as aldeias agrícolas se multiplicaram e se espalharam durante todo o Holoceno, porque na maioria dos anos produziam mais do que precisavam. Elas transformavam a energia da luz solar em riqueza excedente. Isso é muito diferente das sociedades de caça e coleta, que armazenavam conhecimento, mas raramente sentiam necessidade de armazenar bens excedentes porque os alimentos e as matérias-primas de que precisavam estavam ao redor delas. Para que trabalhar como agricultor, perguntavam-se os caçadores-coletores modernos do deserto de Kalahari, quando há tanto mongongo para comer?<sup>1</sup> Nas sociedades de caça e coleta, o lento acúmulo de conhecimento estimulou a migração para novos ambientes, em vez do acúmulo de bens materiais. Em contrapartida, as sociedades agrárias *precisavam* armazenar alimentos, e em grande quantidade, porque muitas plantas e animais eram colhidos durante poucas semanas, mas comidos ou processados ao longo de um ano ou mais. Assim, todas as comunidades agrícolas tinham casas, celeiros, galpões e campos cheios de produtos esperando para serem consumidos.

Com o aumento da produtividade, os excedentes começaram a superar as necessidades anuais daqueles que os produziam. Excedentes de pessoas, excedentes de alimentos, excedentes de bens e excedentes de energia representavam novas formas de riqueza, o que levantava a questão: quem iria controlar (e aproveitar) essa riqueza? Com o tempo, a riqueza excedente seria apropriada por minorias pequenas, mas poderosas, e as estruturas que construía para tanto, frequentemente

com a utilização de formas grosseiras de coerção, formariam os músculos e tendões das civilizações agrárias.

Riqueza excedente significava excedente de pessoas. À medida que a produtividade aumentava, nem todos precisavam cultivar, por isso surgiram novos papéis sociais. Muitas pessoas se tornaram errantes ou escravas, mas outros que não eram agricultores acabaram por controlar grande parte da riqueza excedente da sociedade porque podiam se especializar em papéis sociais úteis. Podiam se tornar sacerdotes em tempo integral, ceramistas ou soldados, filósofos ou governantes. Os especialistas se tornaram peritos em seus papéis limitados. Mas a divisão do trabalho também criou novas formas de dependência. Com a multiplicação dos papéis sociais, as sociedades humanas, como os primeiros metazoários, tornaram-se mais conectadas, mais diferenciadas, mais interdependentes e mais complexas. E surgiram novas estruturas de conexão, os equivalentes sociais de esqueletos, músculos e sistemas nervosos.

Em geral, os especialistas dependiam mais das estruturas de conexão do que os agricultores, que podiam se alimentar por si mesmos. Os arqueólogos conseguem retrair a evolução de uma divisão do trabalho. Na Mesopotâmia, a cerâmica fornece o estudo de caso clássico. Os primeiros vasos da região são simples e idiossincráticos, e a maioria foi feita provavelmente em lares agrícolas comuns. Mas, a partir de cerca de 6 mil anos atrás, encontramos oficinas especiais com rodas de oleiro. Os oleiros produziam grandes quantidades de tigelas, pratos e jarros padronizados e os vendiam em amplas áreas. Esses objetos parecem o trabalho de profissionais em tempo integral que investiram em equipamentos especializados e longos aprendizados. A especialização encorajou novas habilidades e técnicas, por isso era tanto uma medida

quanto um fator de mudança tecnológica. Por exemplo: os ceramistas precisavam de fornos para queimar suas panelas e, com o tempo, passaram a construir fornos mais eficientes que funcionavam a temperaturas mais altas e produziam melhores acabamentos. Mas fornos melhores eram exatamente do que se precisava para separar cobre, estanho ou ferro dos minérios em que estavam embutidos, para que os metais pudessem ser moldados, curvados ou martelados para produzir utensílios domésticos, ornamentos e armas. Artesãos do cobre, ourives, prateiros e ferreiros usaram tecnologias criadas por ceramistas profissionais.

À medida que os excedentes cresciam, multiplicavam-se as especializações. Há 5 mil anos, na cidade de Uruk, no sul da Mesopotâmia, alguém compilou uma lista de cem diferentes papéis especiais, a Lista de Profissões Comuns. Ela era obviamente importante e muito conhecida, porque listas semelhantes foram copiadas por aprendizes de escribas por muitos séculos. Organizada de forma hierárquica, a lista inclui reis e cortesãos, sacerdotes, coletores de impostos e escribas, artesãos de prata e ceramistas, e até artistas como os encantadores de serpentes. Os oleiros e encantadores de serpentes, diferentemente dos agricultores, não produziam alimentos, couros ou fibras; por isso, alimentavam e vestiam suas famílias trocando seus produtos e serviços por alimentos e outras necessidades. É por isso que o comércio, os mercados e os dispositivos contábeis, como as moedas e a escrita, eram tão vitais para as sociedades complexas quanto as artérias e as veias são para os corpos humanos. Eles tornaram possível transferir objetos e os fluxos de energia que representavam, de indivíduo para indivíduo e de grupo para grupo. Até mesmo os especialistas religiosos que descrevemos como sacerdotes tinham de trocar seus serviços

espirituais por comida e outras necessidades. Onde encontramos templos, encontramos também doações e presentes.

O grau de especialização era limitado pela produtividade da agricultura e pelo número de pessoas a mais que cada agricultor podia alimentar. Na maioria das civilizações agrárias, eram necessários cerca de dez agricultores para sustentar um não agricultor. É por isso que a maioria tinha de cultivar. Mesmo nas primeiras cidades, a maioria das pessoas cultivava plantações em seus quintais ou fora das muralhas da cidade. Mas, embora os agricultores constituíssem a maior parte da população e fornecessem a maior parte dos recursos da sociedade, os especialistas tornaram-se cada vez mais importantes à medida que as sociedades se tornavam mais interdependentes. Os agricultores começaram a comprar bugigangas ou ferramentas agrícolas e descobriram que tinham de lidar com vendedores ambulantes, cobradores de impostos, proprietários de imóveis e supervisores. Vários especialistas diferentes movimentavam bens e recursos entre vilas e cidades, produziam as moedas usadas nos mercados e os arados e espadas de metal usados por agricultores e soldados, mantinham a contabilidade, policiavam as leis, rezavam aos deuses em nome de todos ou organizavam e governavam os outros. Os especialistas forneciam os suportes e pilares para as civilizações agrárias. É por isso que acabaram por organizar e dominar o resto da sociedade.

À medida que a especialização aumentava, crescia também a desigualdade. As comunidades agrícolas mais antigas eram razoavelmente igualitárias, mesmo quando ultrapassavam o número máximo de 150 a duzentas pessoas. A cidade neolítica de Çatalhöyük (na Turquia moderna) floresceu de 8 mil a 9 mil anos atrás, e mostra pouca variação no tamanho das moradias familiares, embora sua população

possa ter atingido vários milhares de habitantes. Porém, com o decorrer do tempo, começamos a encontrar cada vez mais minorias ricas. Para tomar um exemplo aleatório: há um cemitério de 6 mil anos perto de Varna, no mar Negro, que contém mais de duzentos túmulos. Muitos dos mortos foram enterrados com nada ou com apenas alguns objetos simples, mas cerca de 10% das sepulturas guardavam muito mais; uma delas continha mais de mil objetos, na maioria feitos de ouro, inclusive pulseiras, machados de cobre e até mesmo uma capa de pênis.<sup>2</sup> Trata-se de uma pirâmide de riqueza muito conhecida, com uma elite composta de cerca de 10% da população e um indivíduo no topo, enquanto a maioria das pessoas vive perto da subsistência. Quando encontram crianças pequenas enterradas com grande riqueza, os arqueólogos podem ter certeza de que não existem apenas hierarquias, mas hierarquias que cruzam gerações, porque as crianças não poderiam ter alcançado um alto status por conta própria. Trata-se de sinais de aristocracias e castas. Grandes projetos de construção, como palácios, pirâmides, zigurates e templos, também nos dizem que alguém tinha o poder de organizar o trabalho de muitos outros indivíduos.

À medida que os gradientes de poder e privilégio se aprofundavam, novos suportes sociais eram necessários para sustentá-los. Alguém tinha de policiar os mercados, punir batedores de carteira e ladrões, contabilizar pagamentos de impostos e organizar camponeses, nômades e escravos nos grupos de trabalho que construía palácios e mantinham canais. As sociedades complexas também precisavam de especialistas religiosos para garantir que seus deuses os protegessem de doenças e fornecessem muitas chuvas. Quando essas estruturas falhavam, todos eram afetados, e é por isso que, na maior parte do tempo, até mesmo

aqueles que estavam no fundo da pirâmide costumavam obedecer a seus senhores.

Os antropólogos estudaram o surgimento de hierarquias em sociedades modernas de pequena escala, como as da Melanésia, no Pacífico ocidental. Ali, figuras poderosas, conhecidas pelos antropólogos como homens grandes ou chefes, construíram seu poder sobre o respeito e o apoio leal da família, de aliados e seguidores. Mas o poder deles sempre foi precário. Se deixassem de distribuir riqueza e privilégios suficientes para manter a lealdade de seus seguidores, poderiam perder rapidamente seu poder, sua riqueza e, às vezes, a vida. Por que seguir alguém que não pode coagi-lo e de quem você não recebe benefícios?

Por fim, em sociedades maiores, surgiram líderes muito mais poderosos; eles governavam centenas de milhares de pessoas e controlavam fluxos tão grandes de riqueza que, com seus aliados, podiam comprar o músculo necessário para impor sua vontade pela força, quando preciso. Com efeito, o uso da força para extrair trabalho, produção ou riqueza tornou-se onipresente nas civilizações agrárias. É por isso que a escravidão e o trabalho forçado eram comuns nas civilizações agrárias. E os métodos usados para extrair riqueza e trabalho dos camponeses mostram que sua condição era frequentemente um pouco melhor que a dos escravos. Um documento maravilhoso do Egito, escrito no final do segundo milênio a.C., dá uma ideia dos métodos rotineiramente usados para fazer com que os camponeses entregassem recursos excedentes.<sup>3</sup> O autor é um escriba que explica por que é bom ser escriba. Pense no trabalho duro de um camponês, nas longas horas gastas trabalhando nos campos, no calor e no frio, ou cuidando do gado, ou consertando equipamentos agrícolas e construções. E então imagine o

que pode acontecer quando os coletores de impostos aparecem com guarda-costas armados.

Um diz [ao camponês]: “Dê grãos”. “Não há” [diz ele]. Ele é espancado selvagemmente. É amarrado, jogado no poço, submerso de cabeça para baixo. Sua esposa está amarrada em sua presença. Seus filhos estão em grilhões. Seus vizinhos os abandonam e fogem.

Há certamente alguma caricatura nisso, mas temos muitos indícios de que métodos extorsivos eram usados em todas as civilizações agrárias para manter a ordem e extrair trabalho e recursos da maioria da população.

Em geral, chamamos as estruturas de poder capazes de exercer esse tipo de controle sobre áreas extensas de *Estados*. Os Estados surgiram em sociedades que eram populosas e ricas o suficiente para ter cidades e vilas, bem como um grande número de aldeias agrícolas e muita mão de obra excedente que poderia prover pessoal e pagar exércitos e burocracias.

## DAS VILAS ÀS CIDADES E AOS GOVERNANTES: MOBILIZAÇÃO E UM NOVO NÍVEL TRÓFICO

Ao mesmo tempo que cresciam as populações e os excedentes, o mesmo acontecia com o tamanho das maiores comunidades humanas. E as comunidades, assim como as pessoas, começaram a se especializar. Algumas aldeias cresceram e adquiriram novos papéis porque estavam perto de rotas comerciais, controlavam travessias estratégicas de rios, realizavam feiras que atraíam compradores e vendedores de outras aldeias, ou estavam perto de locais religiosos importantes. Çatalhöyük, no sul da Anatólia, era cercada por boas terras agrícolas, mas também tinha obsidiana, o vidro vulcânico usado para fazer as lâminas neolíticas mais finas e afiadas. Seus habitantes podem ter comecado obsidiana até com a Mesopotâmia. Jericó, um dos locais mais antigos de colonização contínua de qualquer parte do mundo, foi colonizada pela primeira vez em tempos natufianos, porque tinha um poço que nunca secava. Há 9 mil anos, Jericó já evoluíra para uma vila de talvez 3 mil habitantes.

As vilas cresciam e algumas ofereciam novos serviços, empregos e bens. Mais gente era atraída para elas e, com o tempo, adquiriram poder sobre as aldeias e vilas de seu interior. Há 5 mil anos, algumas vilas grandes já se haviam transformado em cidades, comunidades enormes e diversificadas sustentadas por vilas e aldeias vizinhas e com grande concentração de especialistas. A diversidade de conhecimentos especializados, empregos, bens e pessoas encontrada nas cidades explica por que elas se tornaram dinamos tecnológicos, comerciais e políticos em todas as civilizações agrárias e por que elas atraíam as pessoas do interior.

O surgimento das cidades e dos Estados marca uma transformação fundamental nas sociedades humanas.

Os Estados tradicionais eram muito diferentes dos Estados modernos. Acima de tudo, faltavam-lhes as tecnologias de comunicação e as burocracias que possibilitaram aos Estados modernos intrometer-se na vida de todos os seus cidadãos. Os governantes tradicionais podiam exercer uma força imensa local, mas poderia levar semanas ou meses para enviar uma ordem às províncias remotas e o mesmo tempo para saber o resultado. Assim, longe dos grandes centros populacionais, o poder dos governantes dependia de redes frouxas e hierárquicas de senhores locais, que muitas vezes governavam seus territórios como feudos mais ou menos independentes. Não obstante, os primeiros Estados foram um fenômeno novo na história da humanidade. Todos eles assumiram o direito de concentrar a riqueza de comunidades agrícolas, vilas e cidades em troca de algum grau de proteção. Como disse o teórico político inglês Thomas Hobbes em *Leviatã* (1651), o direito de distribuir recursos “pertence em todos os tipos de comunidade ao poder soberano. Pois, onde não há comunidade, existe [...] uma guerra perpétua de cada homem contra seu vizinho”. As elites tradicionais deviam seu poder, em parte, à fraqueza intrínseca e ao isolamento das comunidades agrícolas tradicionais. Como observou Karl Marx, os camponeses não tinham mais unidade do que batatas num saco.<sup>4</sup> Isso os tornava vulneráveis à predação, porque até os governantes fracos podiam usar um pequeno número de agentes para impor sua vontade, aldeia por aldeia. Esse equilíbrio desigual de poder explica por que, durante milhares de anos, pequenos grupos de governantes e funcionários dominaram com sucesso populações muito maiores de agricultores.

A história das primeiras cidades, dos primeiros Estados e das primeiras civilizações agrárias é mais conhecida na Suméria, no sul da Mesopotâmia. Ali, um grande aglomerado de cidades emergiu com muita rapidez há cerca de 5,5 mil anos. A aglomeração do sul da Mesopotâmia chamada Uruk é frequentemente descrita como a primeira cidade da história da humanidade. Era um porto do rio Eufrates. Como a maioria das cidades mesopotâmicas, dependia de sistemas de irrigação complexos e bem administrados, alimentados pelos principais rios. Mas também fazia fronteira com os pântanos do delta meridional do rio. Com efeito, ela pode ter crescido em um período de clima seco que forçou as pessoas de aldeias periféricas a migrarem para as cidades com seus bem mantidos sistemas de irrigação. Há 5,5 mil anos, Uruk tinha uma população de 10 mil habitantes que viviam em margens opostas do rio Eufrates. Duzentos anos depois, é provável que tivesse cerca de 50 mil habitantes vivendo numa área de cerca de 2,5 quilômetros quadrados.<sup>5</sup> Em algum momento, o rio Eufrates deslocou seu curso e começou a correr ao redor da cidade.

Uma cidade de 50 mil habitantes pode não parecer impressionante hoje. Mas em sua época Uruk era um monstro, talvez a maior comunidade estabelecida que já existira na história da humanidade. Ela tinha dois grandes complexos de templos. Isso significa que deve ter havido sacerdotes ou reis poderosos capazes de mobilizar o trabalho de milhares de pessoas, muitas delas escravas. Uruk tinha oficinas que produziam objetos de grande beleza e possuía depósitos de grãos e bens preciosos. Relatos de algumas centenas de anos depois nos dão uma ideia do que poderíamos ter visto se tivéssemos visitado Uruk quando era a capital do rei Gilgamesh, o herói da primeira epopeia escrita. Havia grandes complexos de templos e palácios reais. Veríamos jardins, ruas

estreitas e vielas com oficinas, estalagens e santuários. A cidade era cercada por uma muralha de tijolos queimados, e canais levavam ao porto e às terras agrícolas próximas. Na epopeia de Gilgamesh, o rei diz: “Um terço do total é cidade, um terço é jardim e um terço é campo, com o precinto da deusa Ishtar”. Os arqueólogos encontraram objetos ao estilo de Uruk em lugares tão distantes quanto a Anatólia e o Egito, o que sugere que os mercadores de Uruk comerciavam numa grande área.

Por volta de 5 mil anos atrás, a primeira escrita apareceu em Uruk, em placas de barro nos templos de Eanna. Mais complexidade significava mais informação, e a escrita era a nova tecnologia que permitia aos ricos e poderosos controlar os crescentes recursos e fluxos de energia à sua disposição. Quase todos os primeiros escritos da Mesopotâmia consistem em inventários — tantas vacas e touros, tantas ovelhas, tantos fardos de linho, tantos escravos. Eles nos contam que estamos agora em um mundo de crescente desigualdade em que redes de governantes, aristocratas e funcionários controlam fluxos de informação e poder que lhes permitem utilizar a energia e a produção de um grande número de escravos, agricultores e artesãos.

Um maravilhoso artefato conhecido como Padrão de Ur, exibido em forma reconstruída no Museu Britânico, nos dá um vislumbre vívido das cidades do sul da Mesopotâmia há quase 5 mil anos. O Padrão de Ur é um objeto em forma de caixa que pode ter sido parte de um instrumento musical ou ter sido carregado em procissões; não sabemos qual era sua verdadeira função. Em seus lados há imagens em mosaico feitas de conchas do golfo Pérsico, lápis-lazúli do Afeganistão e pedras vermelhas da Índia. Um lado mostra a cidade de Ur em paz. Uma figura real e senhores ricos estão sentados em um banquete acompanhado por um cantor com uma lira. O rei e os nobres são maiores que os servos, uma

convenção artística que destaca a posição e a importância deles. Painéis inferiores mostram bens e animais sendo trazidos para a cidade, talvez para o festim. Os excedentes produzidos pelos agricultores estão sendo levados para serem consumidos pelos grupos de elite. O outro lado do padrão mostra Ur em guerra e ilustra algumas das forças que mantinham esses gradientes íngremes de riqueza e poder. No topo está uma figura que é maior que todas as outras e é certamente um rei. Abaixo, vemos soldados em uniformes oficiais, e líderes militares montando carros de guerra puxados por burros. Alguns parecem atropelar soldados inimigos, enquanto outros arrastam cativos nus com ferimentos claramente visíveis.

As cidades do sul da Mesopotâmia de 5 mil anos atrás representam o tipo de sociedade que dominaria a história nos milhares de anos seguintes. Exércitos caros e bem equipados possibilitaram que os governantes e as elites que os apoiavam repelisses os inimigos estrangeiros e mantivessem os gradientes de poder e riqueza dos quais dependiam seu próprio poder e riqueza. Assim como as bombas de prótons mantêm um gradiente de energia nas membranas celulares, os soldados e os séquitos armados dos nobres mantinham gradientes de persuasão e coerção que bombeavam a riqueza das aldeias para vilas, cidades e governos. Imagens dessas hierarquias de poder, com reis e senhores ameaçando seus inimigos e súditos, aparecem em todas as civilizações agrárias.

Do ponto de vista ecológico, os Estados e seus governantes representam um novo passo na cadeia alimentar, um novo nível trófico. Vimos como a energia da luz solar entra na biosfera através da fotossíntese e viaja de plantas para herbívoros e carnívoros. E vimos como a maior parte dessa energia é desperdiçada em cada nível trófico,

numa espécie de imposto sobre o lixo. Isso deixa muito menos energia para sustentar os níveis mais altos, e é por isso que há menos leões que antílopes. A agricultura aumentou os recursos disponíveis aos humanos, de modo que os Estados puderam adicionar mais um nível trófico ao topo da hierarquia. Governantes, nobres e funcionários começaram a arrancar riqueza do trabalho e da produção de camponeses, que, por sua vez, obtinham energia e comida da agricultura. Os Estados usavam esses novos fluxos de trabalho, produção e energia para pagar pelos exércitos, burocracias, palácios e bens que os tornavam poderosos e ricos.

Quando pensarmos sobre esses processos em termos ecológicos, vemos que a riqueza nunca consiste em coisas; consiste no controle dos fluxos de energia que fazem, movem, exploram e transformam as coisas. A riqueza é uma espécie de luz solar comprimida, assim como a matéria é energia congelada. Mobilizar essa energia comprimida do resto da população, junto com os fluxos de recursos que ela possibilitou, tornou-se a tarefa fundamental para governantes e governos, e essa tarefa moldaria todos os aspectos da evolução e da história das civilizações agrárias.

Com efeito, a mobilização era mais fundamental para o trabalho dos Estados tradicionais do que para os Estados modernos. Os governantes tradicionais não precisavam se preocupar muito com a educação, a saúde ou a vida cotidiana da maioria de seus súditos porque os camponeses podiam geralmente se sustentar. Na verdade, muitos camponeses continuavam a viver em aldeias independentes, fora do alcance de Estados e impérios, de modo que, onde os Estados mandavam nos camponeses, sua principal tarefa era extrair recursos deles. E, com o tempo, os governantes, funcionários e nobres tornaram-se cada vez mais hábeis nessa tarefa. Se precisassem de mais recursos para construir

palácios ou estradas, recrutar novas legiões de soldados ou pagar por seus próprios bens de luxo, poucos governantes tradicionais optavam pela moderna estratégia de investir em inovações para aumentar a produtividade. Eles eram tecnologicamente conservadores porque as mudanças eram tão lentas que as inovações raramente geravam retornos significativos no espaço de tempo de uma vida humana e frequentemente interrompiam os fluxos existentes de riqueza. Os governantes poderiam investir em novas armas ou construir estradas, mas, na maior parte, o desafio era aumentar os recursos disponíveis com as tecnologias existentes por meio de formas tradicionais de mobilização.

Para aumentarem sua riqueza e poder, os governantes tradicionais tinham três opções principais. Os mais previdentes estimulavam os camponeses a arar terras não cultivadas e instavam os comerciantes a procurar novas mercadorias. Mas muitos buscavam ganhos mais rápidos usando duas outras estratégias mais arriscadas e mais coercitivas. Eles podiam pressionar mais suas próprias populações, sob o risco de revoltas populares ou colapso econômico. Ou podiam apostar em tirar riqueza dos Estados vizinhos enviando seus exércitos. Isso era perigoso, mas muitas vezes funcionava, e é por isso que a maioria das elites tradicionais era guerreira. Isso também explica por que, quando mandavam erguer estátuas em sua honra, os governantes usualmente posavam de armadura e portando armas. Afinal, tratava-se de um mundo em que os recursos eram obtidos principalmente por meio da ameaça de coerção e no qual a capacidade de mobilizar e infligir violência era amplamente admirada. Se você fosse um rei, tirar recursos de seus vizinhos era uma das maneiras mais importantes de aumentar sua economia. E, se tivesse sucesso (pense em Alexandre, o Grande), você provavelmente seria admirado, não importava quanto sofrimento causasse.

O papel central da mobilização é evidente nos manuais da arte de governar que muitos governantes tradicionais produziram. Um dos exemplos mais ricos é o manual indiano *Arthashastra*. Ele foi provavelmente escrito há pouco menos de 2 mil anos, mas reuniu a experiência acumulada de muitos manuais anteriores. Estados poderosos surgiram no norte do subcontinente indiano há cerca de 2,2 mil anos, ao longo do rio Indo. Mas a chamada civilização do Indo entrou em colapso por volta de quatrocentos anos depois. Passados oitocentos anos, surgiram novos Estados, agora também ao longo do rio Ganges, quando as tecnologias do ferro possibilitaram o desmatamento das florestas, fazendo com que a agricultura se expandisse e as populações prosperassem. Por volta de 500 a.C., surgiram cidades e Estados poderosos, alguns dos quais haviam conquistado cidades-Estado menores. Nos duzentos anos seguintes, apareceu o enorme reino de Magadha, com a capital Pataliputra próxima da moderna Patna. No seu auge, Pataliputra talvez tivesse 1 milhão de habitantes, tornando-se tão grande quanto a Roma imperial. Magadha foi conquistada pela dinastia Máuria por volta de 320 a.C., na esteira da invasão malsucedida do norte da Índia por Alexandre, o Grande, em 327 a.C. Alegou-se com frequência que Kautilya, o autor do *Arthashastra*, foi primeiro-ministro do primeiro imperador máuria, Candragupta Máuria (que governou de 320 a 298 a.C.), mas essa obra foi provavelmente escrita vários séculos depois.

O *Arthashastra* começa, como muitos manuais de governança, argumentando que a pior situação para todos é a ausência de Estado, o fato de não haver um governante. Um mundo em que ninguém pode punir os malfeitores “dá origem à lei do peixe — pois, na ausência do distribuidor da punição, um homem fraco é devorado por um homem

mais forte e, protegido por ele, prevalece”.<sup>6</sup> Trata-se evidentemente de um argumento conveniente para os governantes, mas também capta uma verdade mais geral: mesmo para a maioria dos camponeses, havia vantagens em viver dentro de um Estado organizado.

Eis como o *Arthashastra* resume as principais tarefas dos governantes:

A agricultura e a pecuária, juntamente com o comércio, constituem a Economia. Ela é benéfica porque fornece grãos, gado, dinheiro, produtos florestais e mão de obra. Por meio disso, ele [o governante] traz sob seu poder seu próprio círculo e o círculo de seu inimigo usando o tesouro e o exército. O que provê empresa e segurança [...] é a punição [*danda*, o cetro do governante]; sua administração é governo. O governo procura adquirir o que não foi adquirido, salvaguardar o que foi adquirido, aumentar o que foi salvaguardado e conceder o que foi aumentado a beneficiários dignos. Disso depende o bom funcionamento do mundo. A punição, portanto, é a base dos três sistemas de conhecimento.<sup>7</sup>

Está claro que tudo isso diz respeito à mobilização, aos mecanismos de bombeamento que canalizam fluxos de energia, trabalho e riqueza de agricultores, trabalhadores e artesãos para os governantes da sociedade, a fim de manter um Estado estável. Grande parte do manual dá conselhos sobre como coletar impostos, escolher funcionários, formar e suprir exércitos e prisões, e garantir que os camponeses possam produzir riqueza suficiente para a sociedade florescer.

A boa informação era vital para a mobilização. De fato, uma mobilização bem-sucedida significava ter *mais* informações do que aquelas de quem se estava mobilizando recursos. Grande parte do *Arthashastra* descreve como construir redes de espiões, manter registros nos tribunais e registrar os recursos e ativos do governo. Os censos eram vitais. O principal coletor de receita deveria registrar o número total de aldeias e classificá-las por sua riqueza e quantidade de grãos, animais, dinheiro, produção florestal e mão de obra que forneciam, além do

número de soldados. Os administradores das cidades eram aconselhados a “descobrir o número de homens e mulheres dentro de cada [grupo de residências] em termos de suas castas, linhagens, nomes e ocupações, bem como suas receitas e despesas”.<sup>8</sup> Os cobradores de impostos locais deveriam manter registros de quantas pessoas eram “agricultores, vaqueiros, comerciantes, artesãos, trabalhadores e escravos”. Tinham também de listar outros grupos menores, entre eles mágicos, donos de bordéis, donos de tabernas, soldados, médicos e funcionários. Outras autoridades mantinham registros de cavalos (listados por idade, cor, saúde e origem), elefantes e outros recursos naturais importantes.<sup>9</sup>

Os Estados, assim como os seres vivos, são sistemas adaptativos complexos, por isso compartilham muitas características com organismos vivos, e muitos escritores notaram as semelhanças. Na introdução ao *Leviatã*, Thomas Hobbes descreve o Estado como um enorme monstro ou leviatã,

que não é senão um homem artificial, embora de maior estatura e força do que o homem natural [...]. E no qual a soberania é uma alma artificial [...]; os magistrados e outros funcionários judiciais ou executivos, juntas artificiais; a recompensa e o castigo [...] são os nervos [...]; a riqueza e a prosperidade de todos os membros individuais são a força; *Salus Populi* (a segurança do povo) é seu objetivo; os conselheiros [...] são a memória; a justiça e as leis, uma razão e uma vontade artificiais; a concórdia é a saúde; a sedição é a doença; e a guerra civil é a morte.

Com efeito, as principais características dos Estados são semelhantes às dos organismos vivos. Como as células de organismos vivos, os Estados têm fronteiras semipermeáveis, criando uma região interna protegida. Os fluxos através da fronteira são vitais para a sobrevivência do Estado, então eles são cuidadosamente monitorados. Os Estados também têm um “metabolismo” que reúne fluxos de energia e recursos e

os distribui de modo a se manterem em funcionamento sustentando as elites (os “dignos”, como diz o *Arthashastra*) e os exércitos e burocracias que as defendem e administram. Para os Estados, como para os organismos vivos, a fonte última da maioria dos fluxos de energia é a fotossíntese, que permite aos agricultores capturar energia da luz solar. Nos Estados, como nos organismos vivos, os fluxos de energia devem ser administrados com cuidado. Muito pequenos, e o Estado passa fome. Demasiado grandes, e os súditos se revoltam ou morrem de fome, e os fluxos de energia e recursos secam. Assim como os organismos vivos mantêm gradientes eletroquímicos que direcionam os fluxos de energia, os Estados mantêm gradientes de persuasão e coerção. Eles usam a lei, a educação e a religião para persuadir seus súditos de que seu poder é justo. Mas eles também mantêm exércitos e grupos disciplinados de coatores para que possam obrigar à obediência quando a persuasão falha. É por isso que o *Arthashastra* trata a punição (*danda*) como o alicerce do Estado. A coerção foi fundamental para a mobilização de recursos em todas as civilizações agrárias, o que ajuda a explicar a importância da guerra e a difusão das punições físicas na sociedade e dentro dos lares e famílias.

Os Estados, assim como os organismos vivos, mantêm-se informados sobre seus recursos e inimigos para que possam se ajustar constantemente a ambientes instáveis. Ficar alerta aos perigos e rastrear fluxos de riqueza requer algum método de registro de informações, seja por um oficial de justiça, seja por um espião ou um recenseador. É por isso que todos os Estados desenvolveram alguma forma de escrita, até mesmo o Império Inca na América do Sul, cuja escrita assumiu a forma de um conjunto de cordas com nós, o quipo. Em todos os lugares, a escrita se desenvolveu como uma maneira de registrar informações

politicamente úteis. Os Estados têm regras, assim como as células têm genomas. Nos Estados, as regras podem ser encontradas em livros de direito, nos pronunciamentos dos governantes e autoridades locais, em manuais como o *Arthashastra*, esculpidas em pilares de pedra, na sabedoria coletiva de governantes e funcionários, e embutidas em tradições religiosas.

Se pensarmos neles como uma espécie de gênero ou tipo de organismo político, também podemos argumentar que os Estados tradicionais evoluíram ao longo do tempo, à medida que governantes e funcionários aprendiam novos métodos de governo e adquiriam novas tecnologias políticas, militares e burocráticas. Com efeito, a história dos Estados e das civilizações agrárias ao longo de vários milênios tem seus paralelos com a história da biosfera, conforme os Estados entraram em novos nichos e desenvolveram novos métodos de governo e novas tecnologias políticas, à medida em que alguns desapareceram, que novos gêneros evoluíram e que alguns se tornaram cada vez maiores e adquiriram poder e conhecimento crescentes.

## A PROPAGAÇÃO DOS ESTADOS AGRÁRIOS

Os Estados, como a agricultura, apareceram de forma independente em diferentes partes do mundo. Não surpreende que tenham surgido onde a agricultura já florescia havia séculos ou milênios e era suficientemente desenvolvida para sustentar grandes populações, produzir grandes excedentes, formar redes de comércio e intercâmbio, vilas e cidades. Mas os Estados e tudo que os acompanha não apareceram em todas as regiões agrícolas. Em algumas, como a Papua-Nova Guiné ou ao longo do rio Mississippi, a agricultura gerou grandes aldeias e formas modestas de poder, mas não foi produtiva o suficiente para sustentar grandes cidades ou Estados.

Assim como acontece com a agricultura, podemos rastrear a propagação de civilizações agrárias dentro das diferentes zonas mundiais quase como se estivéssemos assistindo à propagação de uma doença infecciosa.

Há 5 mil anos, havia Estados somente no sul da Mesopotâmia e ao longo do Nilo. Mas já estavam se diversificando. Na Mesopotâmia, os primeiros Estados baseavam-se em cidades independentes que pareciam estar constantemente em guerra. Ao longo do Nilo, os primeiros Estados parecem ter sido maiores e as cidades menos importantes. Nos mil anos seguintes, à medida que as populações cresciam e a arte de governar evoluía, os Estados do sul da Mesopotâmia tornaram-se mais poderosos e passaram a controlar áreas maiores. Há 4 mil anos, já havia Estados no Sudão, ao sul do Egito, ainda no vale do Nilo, bem como no vale do Indo, no norte do subcontinente indiano, na Ásia central e no norte da China, às margens do Huang He (rio Amarelo). Mil anos depois, por

volta de 1000 a.C., já se encontravam Estados em grande parte do leste do Mediterrâneo; no sul da China, particularmente às margens do rio Yangtzé; e em partes do sudeste asiático. Na Europa e na África ocidental também havia áreas dominadas por chefes poderosos que mais tarde evoluiriam para sistemas estatais completos. Há 2 mil anos, também havia Estados e civilizações agrárias na zona americana do mundo, em particular na Mesoamérica e nos Andes, e eles tinham o mesmo maquinário metabólico básico dos Estados da Afro-Eurásia.

Estados e impérios tornavam-se mais poderosos e mais ricos. Mas também alcançavam áreas maiores e controlavam populações maiores e mais diversificadas enquanto as tecnologias de governo evoluíam. O estudioso estoniano Rein Taagepera tentou calcular o aumento das áreas sob domínio de Estados. Segundo suas estimativas, em 3000 a.C., os primeiros Estados cobriam uma parte minúscula da Terra, talvez apenas um décimo de um megâmetro. (Um megâmetro é igual a 1 milhão de quilômetros quadrados, ou aproximadamente o tamanho do Egito moderno.) Entre 2000 e 1000 a.C., a área sob controle deles equivalia a cerca de 1% da área governada pelos Estados atualmente. A maior parte do mundo ainda era habitada por aldeias agrícolas e de caça e coleta independentes.

O milênio entre 4 mil e 3 mil anos atrás (entre 2000 e 1000 a.C.) nos lembra que os Estados, assim como ascendiam, podiam cair. No vale do Indo, no Paquistão moderno, um sistema inteiro de Estados acabou, deixando para trás apenas ricos vestígios arqueológicos e inscrições desafiadoras que ainda não foram decifradas. Mas depois de 1000 a.C. o ímpeto retornou e novos Estados apareceram em novas regiões, enquanto sistemas estatais mais antigos floresciam e se expandiam. O Império Aquemênida, fundado pelo imperador persa Ciro por volta de

560 a.C. sobre os restos do Império Assírio, no norte da Mesopotâmia, foi provavelmente o primeiro megaimpério. No seu auge, pode ter controlado seis megâmetros. Dois séculos depois, o Império Máuria, no norte da Índia, pode ter se estendido por três megâmetros, enquanto na China o império Han era tão grande quanto o Império Aquemênida. Há 2 mil anos, quando o Império Romano e o Han floresceram, os primeiros sistemas estatais surgiram na Mesoamérica e nos Andes, embora fossem menores e menos populosos do que os megaimpérios da zona mundial afro-eurásiana. Taagepera estima que, há 2 mil anos, os sistemas estatais controlavam cerca de dezesseis megâmetros, ou cerca de 13% da superfície terrestre da Terra.

A disseminação de Estados e civilizações estimulou novas formas de aprendizagem coletiva à medida que tecnologias, mercadorias, ideias, religiões e filosofias se difundiam por vastas áreas dentro das maiores zonas do mundo. A expansão das populações, dos sistemas de comércio e dos sistemas estatais foi impulsionada não só pelos crescentes fluxos de alimentos e energia da agricultura, mas também pela inovação. Com mais pessoas vivendo numa diversidade maior de ambientes, as informações e inovações se acumularam mais rápido do que nunca. Particularmente importantes foram as tecnologias que aceleraram as trocas, como novas formas de dinheiro, ou melhores navios e estradas. Os impérios da Afro-Eurásia foram todos grandes construtores de estradas. As estradas eram, afinal de contas, as artérias dos impérios. Os governantes construíam estradas para que seus exércitos e mercadores pudessem se mover mais rápido e ir mais longe, mas também estabeleceram sistemas de correios para que pudessem saber rapidamente sobre revoltas ou ameaças inimigas. A Estrada Real de Susa, na Pérsia, até Sardes, perto da moderna Éfeso, foi construída pelo

imperador aquemênida Dario e descrita por Heródoto. Estendia-se por mais de 2,7 mil quilômetros e permitia que mensageiros usassem o revezamento de cavalos descansados para cobrir em sete dias uma distância que caminhantes levariam noventa dias para percorrer.

A escrita possibilitou que os governantes armazenassem informações importantes sobre seus impérios e súditos. Novas tecnologias militares, como melhores arreios para cavalos e selas de camelo, ou catapultas mais poderosas e carros de guerra mais velozes, transformaram a guerra, enquanto a melhoria das comunicações por terra e mar transformava o comércio e facilitava o transporte de produtos agrícolas. A partir da época da antiga Suméria, novas tecnologias metalúrgicas se espalharam pela zona mundial afro-eurasiana, começando com o bronze, uma liga de cobre e estanho. Há cerca de 3 mil anos, fornos passaram a ser eficientes para fundir ferro, que era mais resistente que o bronze e também mais barato, porque os minérios de ferro eram muito mais comuns e acessíveis do que os minérios de estanho ou cobre. Na Idade do Ferro, a partir de 1000 a.C., os metais foram usados para fazer armas, implementos agrícolas, arreios, carroças e carruagens, e até mesmo para utensílios domésticos comuns, como panelas e assadeiras.

A aprendizagem coletiva moldou o pensamento educacional, filosófico e científico, e estava por trás das sofisticadas teologias das principais religiões estatais, as quais incorporavam histórias das origens em seus relatos sobre o mundo. A maioria dos Estados tentava influenciar as ideias religiosas de seus súditos, então construíam templos e sustentavam sacerdotes oficiais. Com frequência, perseguiram xamãs ou outras figuras religiosas que preservavam crenças e práticas religiosas não oficiais. Os primeiros Estados adoravam divindades locais, mas, com a sua expansão para áreas maiores, seus deuses também pareciam

adquirir maiores poderes e maior alcance. Nos maiores impérios, vemos o surgimento de divindades supremas, como Ahura Mazda, o deus supremo zoroastriano do Império Aquemênida. Eram deuses cujos devotos os viam como governantes universais, assim como os impérios que os adoravam reivindicavam governar o mundo conhecido. Todas as principais religiões do mundo, inclusive o judaísmo, o cristianismo e o islamismo, bem como as tradições religiosas de Roma e da Grécia, do hinduísmo, do budismo e do confucionismo, e as tradições religiosas dos impérios americanos, incorporavam deuses sobre-humanos. E, na maior parte, os governantes e os líderes das tradições religiosas institucionalizadas trabalhavam juntos porque entendiam o quanto as crenças religiosas podiam ser poderosas como forma de gerar apoio para os sistemas dos quais ambos se beneficiavam.

Governantes hábeis aprenderam muitas maneiras de aumentar sua riqueza. Eles tentavam proteger os camponeses do excesso de exploração, porque compreendiam que a maior parte de sua riqueza vinha das aldeias camponesas. Era perigoso oprimir demais os camponeses e sensato protegê-los dos exércitos inimigos ou dos senhores predadores e sustentá-los com os estoques de grãos quando as colheitas fracassavam. Como dizia o *Arthashastra*, os camponeses eram a base econômica de cada Estado, e os governantes sábios queriam que os camponeses prosperassem. Governantes habilidosos também estimulavam o comércio internacional a fim de obter bens estratégicos raros e valiosos, como joias preciosas ou sedas para os ricos, estanho para fazer bronze, ou até grãos para alimentar suas cidades. Muitos também negociavam pessoas, pois a captura e a venda de escravos como trabalhadores, servos e soldados floresciam nas estepes e nos enormes mercados de escravos do Mediterrâneo oriental e da Ásia central. Os governantes que mais

lucravam com o comércio investiam em mercados e caravancas, protegiam os comerciantes e construía estradas, canais e portos para transportar mercadorias com mais rapidez e para mais longe.

À medida que os Estados se expandiam, o mesmo acontecia com as redes de intercâmbio. Há 4 mil anos, as cidades da Mesopotâmia já negociavam com a Índia, o Egito e a Ásia central, enquanto partes da Ásia central negociavam com a China. Há 2 mil anos, essas redes já transportavam grandes quantidades de mercadorias, como sedas, moedas, objetos de vidro e especiarias por toda a Afro-Eurásia, pelas rotas terrestres conhecidas como rotas da seda e através das rotas marítimas do oceano Índico. Essas redes de intercâmbio internacional também transportavam mercadorias que ninguém queria, inclusive doenças como a varíola e a peste bubônica. Pestes, como a que se espalhou durante o reinado do imperador bizantino Justiniano I, há cerca de 1,5 mil anos, podem explicar a desaceleração do crescimento populacional entre 2 mil e mil anos atrás nas regiões mais densamente povoadas da Afro-Eurásia.

Por volta de 2 mil anos atrás, já havia grandes impérios em toda a Afro-Eurásia, como os impérios Romano, Sassânida, Kushana, Múria e Han. E havia muitos Estados semidependentes menores entre eles. Durante o milênio seguinte, entre 2 mil e mil anos atrás, alguns dos maiores impérios entraram em colapso, inclusive os dois maiores de todos, o Romano e o Han. As doenças e o colapso imperial diminuíram o ritmo de crescimento por quase um milênio. Mas, há mil anos, já havia novos sinais de crescimento. Aldeias, cidades e redes comerciais expandiram-se em regiões anteriormente despovoadas do sul da China, do norte da Europa e da África. O mais espantoso de tudo talvez tenha

sido o surgimento de novos sistemas políticos associados a uma nova religião mundial, o islamismo, no século VIII.

Quatro séculos depois, no início do século XIII, o Império Mongol foi criado por nômades pastoris liderados por Gêngis Khan. Embora tenha durado menos de um século, foi o maior império que existiu até então e o primeiro a atravessar toda a Afro-Eurásia, da Coreia à Europa oriental. Na América, os primeiros sistemas estatais de verdade surgiram há cerca de 2 mil anos, na Mesoamérica e nos Andes. Muitos Estados americanos, como o dos maias, estavam baseados em cidades únicas, como as cidades-Estado da Suméria, 3 mil anos antes. Na época do Império Mongol, havia também sistemas imperiais na América que controlavam muitas cidades e grandes territórios. Entre eles, estavam os predecessores dos impérios Asteca e Inca.

## MEDIDAS DAS MUDANÇAS NA ERA AGRÁRIA DA HISTÓRIA HUMANA

Na era agrária, pela primeira vez, temos informações suficientes para tentar medir algumas mudanças fundamentais na história humana. Podemos tentar estimar como as sociedades humanas usavam energia e como a energia e a complexidade crescente se ligavam na história humana, como nas histórias das estrelas e da biosfera. Os números do Apêndice deste livro oferecem algumas medidas muito aproximadas do papel da energia na história do homem e seu impacto na vida humana. Os números são evidentemente muito provisórios, mas baseiam-se em algumas das estimativas mais cuidadosas que temos das mudanças em grande escala na história humana. E a história que eles contam é importante e pode nos ajudar a ver os contornos mais amplos da história humana.

No capítulo anterior, vimos que as populações humanas cresceram durante o Paleolítico, mas de forma muito lenta, talvez 250 mil pessoas a cada milênio nos últimos 20 mil anos da era glacial mais recente. Os números da coluna B do Apêndice mostram a aceleração acentuada do crescimento populacional após a introdução da agricultura. Entre 10 mil e 5 mil anos atrás, as populações humanas quadruplicaram e, depois, entre 5 mil e 2 mil anos atrás, decuplicaram novamente. Assim, durante todo o período, de 10 mil a 2 mil anos atrás, as populações humanas aumentaram cerca de quarenta vezes, a uma taxa média de 25 milhões a cada milênio, ou cerca de cem vezes a taxa média de crescimento do Paleolítico Superior.

Esse crescimento populacional rápido foi possível graças a enormes aumentos na energia consumida por nossa espécie (coluna C). Há 2 mil

anos, os humanos já usavam setenta vezes mais a quantidade de energia que consumiam no final da última era glacial. Essa bonança energética colossal da agricultura pagou pelo crescimento da população, pelos vários impostos de complexidade da entropia e, finalmente, pela riqueza dos ricos e poderosos. Há poucos sinais de que melhorou a vida da maioria dos seres humanos.

A maior parte da bonança energética pagou pelo crescimento populacional. Mas nem toda, porque, como mostra a coluna D, houve um ligeiro aumento na quantidade de energia consumida por pessoa a partir de 5 mil anos atrás. Não podemos medir com precisão como essa energia extra foi alocada, mas o que já sabemos sobre a evolução das sociedades agrárias sugere as maneiras mais importantes de seu uso. Foi utilizada primeiro para pagar pela complexidade crescente. A coluna F no Apêndice estatístico oferece uma medida muito aproximada da complexidade crescente, na suposição de que o tamanho das maiores cidades indica o alcance da capacidade humana de construir, manter e pagar estruturas sociais e tecnológicas complexas. Afinal, as cidades, como as civilizações em geral, dependem de uma enorme quantidade de organização e de gastos imensos em edifícios, estradas e rodovias, canais de irrigação, palácios e templos, funcionários, polícia, mercados e soldados. Podemos considerar que essas despesas fazem parte dos impostos sobre a complexidade pagos à entropia. Houve também uma espécie de imposto sobre o lixo pago à entropia. Trata-se da energia da qual ninguém realmente se beneficiava, e isso inclui a energia desperdiçada durante guerras e desastres naturais ou epidemiológicos.

Sabemos que parte da energia extra da agricultura também contribuiu para melhorar a vida dos grupos de elite que compunham algo como 10% da maioria das civilizações agrárias. As elites controlavam grandes

fortunas, e é provável que até mesmo o lento aumento na expectativa de vida (coluna E) estivesse em grande parte confinado aos poderosos e ricos. Assim, pelo menos parte da bonança energética da agricultura ajudou a melhorar algumas vidas humanas. Mas, depois de todos esses outros gastos, sobrava pouco para elevar o padrão de vida do resto da população. É por isso que todos os indícios que temos sugerem que, embora o povo certamente gozasse de luxos ocasionais, a maior parte dele viveu perto do nível de subsistência durante toda a era agrária. O economista francês Thomas Piketty estimou que na maioria dos países europeus, ainda em 1900, 1% da população possuía cerca de 50% da riqueza nacional e 10% da população respondia por 90% da riqueza nacional. Os outros 90% da população viviam com somente 10% da riqueza nacional. Não havia classe média de verdade no sentido moderno porque “os 40% do meio da distribuição de renda eram quase tão pobres quanto os 50% de baixo. A vasta maioria das pessoas não possuía praticamente nada, enquanto a parte de leão dos ativos da sociedade pertencia a uma minoria”.<sup>10</sup>

Se essa distribuição de riqueza era típica da maioria das civilizações agrárias, ela dá suporte à conclusão geral de que a bonança energética da agricultura melhorou a vida de não mais do que um décimo de todos os seres humanos. Mas essa é certamente a história da maioria das corridas do ouro. A disseminação da riqueza de forma mais ampla exigiria mais uma bonança energética, ainda mais espetacular do que a bonança energética da agricultura. O próximo capítulo descreve as mudanças que prepararam o caminho para o limiar 8, o qual estabeleceria as bases para o espantoso mundo rico em energia de hoje.

## 10. À beira do mundo de hoje

*A descoberta da América e a de uma passagem para as Índias Orientais pelo cabo da Boa Esperança são os dois maiores e mais importantes eventos registrados na história da humanidade. [...] Por unirem, até certo ponto, as regiões mais distantes do mundo, por possibilitar-lhes aliviar mutuamente as necessidades, aumentar suas satisfações e estimular sua atividade, sua tendência geral pareceria ser benéfica. Para os nativos, porém, tanto os das Índias Orientais quanto os das Índias Ocidentais, todos os benefícios comerciais que possam ter advindo desses eventos soçobraram e se perderam nos infortúnios horríveis que provocaram.*

Adam Smith, *A riqueza das nações: Investigação sobre sua natureza e suas causas*

*Eu vendo aqui, senhor, o que todo mundo deseja ter — poder.*

Matthew Boulton, o principal investidor no motor a vapor aperfeiçoado de James Watt

Quando descrevemos os limiares anteriores de complexidade crescente, apresentamos algumas suposições sobre as condições Cachinhos Dourados que as tornaram possíveis. À medida que nos aproximamos do mundo de hoje, podemos ver com muito mais precisão como novas condições desse tipo se acumularam, preparando o caminho

para a assombrosa explosão de inovação que criaria o mundo de hoje, o mundo do Antropoceno.

## O MUNDO HÁ SEISCENTOS ANOS

Por volta de 1400, as populações humanas haviam crescido de cerca de 5 milhões, no final da última era glacial, para cem vezes isso, ou quase 500 milhões de pessoas. Ainda havia grandes regiões, na Australásia, em partes da África, na Eurásia central e na Sibéria, e na América, onde as populações eram pequenas e a maioria das pessoas vivia de coleta, caça, pastoreio ou nomadismo pastoral. Mas a maioria dos seres humanos vivia agora no interior de civilizações agrárias e dependia direta ou indiretamente da agricultura. Com efeito, a maioria deles *era* de agricultores. Muitas partes do mundo estavam se enchendo de agricultores, assim como, 10 mil anos antes, algumas regiões se encheram de caçadores-coletores. Até o Pacífico estava se enchendo de marinheiros polinésios que iniciavam as perigosas migrações que os levavam para a maior parte do Pacífico. Aotearoa (Nova Zelândia), a última grande área de terras aráveis no Pacífico, foi colonizada há cerca de 700 anos.

A quantidade de seres humanos cresceu, e também aumentou a pressão para encontrar novas terras, novos recursos naturais, novas fontes de riqueza. Caçadores-coletores e pastores de renas siberianos sofriam pressão crescente de coletores de impostos, comerciantes de peles, mercadores e nômades pastoris para montar armadilhas e vender peles, presas de morsas e produtos florestais. Na Austrália, onde não havia Estados agrários para pressionar por mais recursos, o crescimento populacional forçou as pessoas a aumentar a produção. Em regiões férteis, como em torno da moderna Sydney, os territórios tribais diminuíram à medida que as populações cresceram e as comunidades

locais tiveram que desenvolver tecnologias mais especializadas e intensivas. No porto de Sydney, em séculos recentes, as mulheres pescavam com linhas feitas de casca da árvore *kurrajong* e anzóis especiais produzidos com a concha do caracol marinho conhecido como “turbante de chifres”, que permitiam que pescassem peixes em águas mais profundas. Elas pescavam à noite em canoas feitas de casca de árvores conhecidas como *nowie*, nas quais acendiam fogueiras para se manterem aquecidas, com os bebês em seus peitos. Em 1770, Joseph Banks, que viajava com o capitão Cook, viu a baía Botany de Sydney cheia de luzes cintilantes das *nowies*.<sup>1</sup> Em algumas regiões da Austrália, havia aldeias semipermanentes e um início da agricultura.

Em algumas das maiores ilhas do Pacífico, como o Havaí, Tonga e a Nova Zelândia, a agricultura era produtiva o suficiente para sustentar pequenas cidades e pequenos Estados. Na América Central e nos Andes, a agricultura se espalhou por regiões suficientemente grandes para sustentar não apenas grandes Estados, mas também os primeiros sistemas imperiais americanos. A região central do Império Asteca, que se desenvolveu rapidamente no século XV, localizava-se no México moderno. Sua capital, Tenochtitlán, ficava onde está hoje a Cidade do México. As terras centrais do Império Inca, seu contemporâneo, ficavam nas encostas dos Andes, no Equador e no Peru. Cuzco, sua capital, ficava no sudeste do Peru moderno.

A pressão populacional e a competição para obter novos recursos foram sentidas com mais intensidade na Afro-Eurásia, a mais antiga, maior, mais populosa e mais diversificada das zonas do mundo. Ao buscarem mais energia e recursos naturais, os governantes, empreendedores e camponeses sedentos de terra competiam por novas terras cultiváveis e novas formas de riqueza, como peles, especiarias e

minerais.<sup>2</sup> E estavam sempre dispostos a deixar de lado a caça e a coleta, se necessário. Essas pressões levaram os camponeses a colonizar terras que antes poderiam ter desprezado, no norte da Escandinávia, por exemplo, ou em partes da Ucrânia e da Rússia, nas margens das áridas estepes eurásianas. A pressão para obter recursos naturais fortaleceu e diversificou as redes no interior da Afro-Eurásia, aumentando seu tamanho, a riqueza e a diversidade dos bens e ideias que intercambiavam através das rotas da seda ou através das rotas marítimas do oceano Índico.

Em 1400, uma faixa concentrada de pessoas, cidades e terras agrícolas se estendia do oceano Atlântico, ao longo dos dois lados do Mediterrâneo, através da Pérsia e partes da Ásia central, e penetrava na Índia, no sudeste asiático e na China. Em 1500, o império mais rico e populoso era governado pela dinastia Ming na China. No início do século XV, o imperador Ming, Yongle, enviou vastas frotas, capitaneadas pelo eunuco muçulmano Zheng He, para viajar pelo oceano Índico até a Índia, a Pérsia e os ricos portos da África oriental. Os navios de Zheng He eram alguns dos maiores e mais sofisticados que já haviam sido construídos, e suas muitas viagens fornecem um prenúncio interessante da globalização que estava ao virar da esquina. Mas depois de 1433, com o novo imperador Hongxi, os Ming abandonaram essas expedições. A China era rica e bastante autossuficiente, por isso as expedições de Zheng He tinham pouco valor comercial. Além disso, eram extremamente caras. O novo imperador e seus conselheiros decidiram que o dinheiro gasto com elas poderia ser mais bem aproveitado para, por exemplo, defender as fronteiras do norte do império contra invasores nômades pastoris.

Governantes com menos recursos e populações menores tinham mais motivos para buscar riqueza além de suas fronteiras. Nos séculos XV e XVI, quem se expandiu com especial rapidez foi o jovem império de Moscóvia. Seus governos construíram linhas de fortes que empurraram suas fronteiras para o sul, em direção às pradarias férteis mas áridas ao norte do mar Negro, para sudeste, em direção aos mercados da Rota da Seda da Ásia central, e para leste, nas ricas fontes de peles e minerais da Sibéria. O Império Otomano foi o mais poderoso do mundo muçulmano. No século XVI, seu poder chegou ao sudeste da Europa, atravessou a Mesopotâmia e chegou ao norte da África. Após a conquista do Egito, em 1517, também passou a controlar o lucrativo comércio do oceano Índico para o Mediterrâneo e para a Europa. No mesmo século, um império muçulmano rival surgiu no subcontinente indiano: o Império Mogol, fundado por Babur, um descendente do imperador da Mongólia Gêngis Khan. Na África, havia Estados e impérios poderosos ao norte do Saara, ao longo do Nilo, e na África ocidental, bem como ao longo da costa leste, que estava repleta de cidades comerciais ricas. A Europa ficava no limite oeste da massa de terra eurásiana, longe dos ricos fluxos de riqueza comercial que passavam pelos oceanos Mediterrâneo e Índico. Os venezianos conseguiram explorar esses fluxos comerciais, mas não foi fácil. Em 1500, o império mais poderoso da Europa era o Sacro Império Romano, uma colcha de retalhos de Estados, bispados e principados ligados pelo casamento e pela conquista e que se estendia da Áustria para a Alemanha e chegava à Holanda e à Espanha.

Em 1400, o mundo ainda estava dividido em distintas zonas mundiais, entre as quais não havia contatos significativos. Mas o crescimento das populações e a crescente pressão para obter recursos fizeram com que, mais cedo ou mais tarde, as membranas oceânicas entre as zonas do

mundo fossem rompidas. Quem faria isso, e quando, permanecia incerto, embora pressões intensas na zona afro-eurasiana tornassem extremamente provável que o rompimento viesse de dentro dessa zona.

Em 1492, o oceano entre as duas maiores zonas do mundo foi finalmente atravessado por uma expedição comandada pelo navegador genovês Cristóvão Colombo. Ele persuadira os governantes da Espanha a apoiar seu palpite de que havia uma rota rápida, através do Atlântico, da Europa para os ricos mercados do leste da Ásia. Nos três séculos seguintes, as membranas que separavam a Australásia e a zona do Pacífico também seriam violadas e, pela primeira vez na história humana, as pessoas começariam a trocar informações e ideias, bens, pessoas, tecnologias, religiões e até doenças em todo o mundo.

A mudança foi transformadora. Pela primeira vez desde que as placas tectônicas criaram o único supercontinente da Pangeia, há 250 milhões de anos, genes, organismos, informações e doenças podiam fluir dentro de um único sistema mundial. O historiador Alfred Crosby descreveu essa revolução ecológica como o “intercâmbio colombiano” e mostrou que a globalização transformaria a biosfera tanto quanto transformaria a história humana.<sup>3</sup> No *Manifesto comunista*, Marx e Engels argumentaram que essas mudanças deram início ao capitalismo moderno.

A descoberta da América e a ultrapassagem do cabo da Boa Esperança abriram novos terrenos para a burguesia em ascensão. Os mercados das Índias Orientais e da China, a colonização da América, o comércio com as colônias, o aumento dos meios de troca e das mercadorias em geral, deram ao comércio, à navegação e à indústria um impulso nunca antes conhecido e, desse modo, um rápido desenvolvimento ao elemento revolucionário na cambaleante sociedade feudal.

Tão poderoso foi o choque de ligar as diferentes zonas do mundo que em poucos séculos as sociedades humanas cruzaram o oitavo limiar de complexidade crescente. A mudança foi rápida porque ocorreu em um mundo globalizado. No passado, o aprendizado coletivo havia funcionado em escala local ou regional e, por isso, demorou 10 mil anos para que os agricultores se espalhassem pelo planeta. Em um mundo de redes globais, levou apenas alguns séculos para que grande parte da Terra fosse transformada. Foi a mudança mais momentosa de toda a história de 4 bilhões de anos da biosfera. De repente, os humanos se encontraram conectados dentro de uma única esfera global de pensamento: a noosfera. No século XX, a noosfera tornou-se uma força disruptiva para a mudança em toda a biosfera.

## A CRIAÇÃO DE UM SISTEMA MUNDIAL ÚNICO

Os navegadores europeus foram os primeiros a fazer a ligação entre as principais zonas do mundo. Esse simples fato deu aos governantes e empreendedores europeus uma vantagem colossal durante vários séculos, porque a Europa, outrora longe dos grandes centros de riqueza e poder, passou a controlar os portais pelos quais passavam os maiores fluxos de riqueza e informação da história humana.

Os navegadores europeus invadiram as outras zonas mundiais porque *não* desfrutavam de fácil acesso aos ricos mercados do sul e sudeste da Ásia. Isso significava que tinham que correr riscos se quisessem obter sua parte. Sobretudo, teriam de contornar os mercadores otomanos que dominavam o Mediterrâneo. Esse é um dos motivos pelos quais, em meados do século XV, os governantes portugueses começaram a enviar caravelas altamente manobráveis, armadas com canhões, para investigar a costa ocidental da África. As caravelas, com suas velas latinas inspiradas em modelos islâmicos e suas bússolas e canhões derivados de invenções chinesas, eram elas mesmas exemplos das sinergias intelectuais que se acumulavam dentro da zona mundial afro-eurasiana. Na década de 1450, os navegadores portugueses já haviam estabelecido com o império do Mali lucrativos negócios marítimos que incluíam ouro, algodão, marfim e escravos que anteriormente eram transportados por caravanas de camelos através das rotas terrestres do Saara.

Esses sucessos modestos encorajaram os rivais. O navegador genovês Cristóvão Colombo era um deles. Colombo havia persuadido os governantes espanhóis Fernando e Isabel a apoiá-lo na busca de uma rota ocidental mais direta para a Ásia, navegando pelo Atlântico. Ele

acreditava, incorretamente, que a distância para a China através do Atlântico era muito menor do que muitos supunham. Fernando e Isabel apostaram em sua ideia porque sabiam que, se Colombo estivesse certo, as recompensas seriam estupendas. Em 12 de outubro de 1492, seus navios chegaram a uma ilha que ele chamou de San Salvador, nas Bahamas. Até o final de sua vida, manteve a certeza de que havia chegado à Ásia, ou às Índias, e é por isso que chamou as pessoas que encontrou de índios. Pelo mesmo motivo, ele ficou intrigado com a nudez e a aparente pobreza deles,<sup>4</sup> e com a ausência de quimonos e vestidos de seda. Cativos levaram-no a Cuba, onde encontrou pequenas quantidades de ouro, o que foi suficiente para convencer Fernando e Isabel a financiarem mais viagens. As viagens de Colombo colocaram as zonas do mundo americano e afro-eurasiano em contato regular pela primeira vez. Em 1498, apenas seis anos após a primeira viagem transatlântica de Colombo, um capitão português, Vasco da Gama, mostrou que também era possível alcançar o sudeste da Ásia navegando ao redor do extremo sul da África. O oceano Índico não era um lago vasto e fechado como muita gente supunha.

Muitos, talvez a maioria, dos primeiros encontros entre pessoas das diferentes zonas mundiais foram violentos, caóticos e destrutivos. A suspeita em relação a estranhos teve um papel nisso, assim como as muitas diferenças em densidade populacional, tecnologia, padrões de organização social e militar e até mesmo na resistência a doenças acumuladas ao longo de muitos milênios. Houve vencedores e perdedores e, para os perdedores, o resultado podia ser catastrófico. Assim como o aparecimento da primeira atmosfera de oxigênio ou a morte súbita dos dinossauros, trata-se de um exemplo do que o economista austríaco Joseph Schumpeter chamou de *destruição criativa*

— a substituição constante e muitas vezes violenta do antigo pelo novo, que para Schumpeter é o próprio coração do capitalismo moderno. Muitas sociedades foram arruinadas e muitas vidas, destruídas. Mas também houve criação, porque a pura escala das primeiras redes de intercâmbio global levou à aprendizagem coletiva em escala planetária, liberando enormes fluxos de informação, energia, riqueza e poder que acabariam por transformar as sociedades humanas em todo o mundo.

Quase todas as vantagens estavam com os Estados e impérios sedentos de recursos na beira ocidental da Afro-Eurásia, cujos navios foram os primeiros a romper as barreiras entre as zonas do mundo. Eles exploraram essas vantagens com deleite predatório e eficiência implacável. Cinquenta anos após a primeira viagem de Colombo, os portugueses já haviam usado suas caravelas armadas para construir pontos fortificados que uniam um império comercial no oceano Índico. Os riscos para os mercadores e marinheiros eram enormes, mas também os possíveis lucros. Na América, conquistadores espanhóis como Hernán Cortés e Francisco Pizarro tomaram o controle das ricas civilizações dos astecas e incas. Conseguiram isso com pequenos exércitos que exploraram divisões políticas no interior de ambos os impérios. Mas eles foram ajudados pelo impacto devastador de doenças europeias como a varíola, que pode ter matado até 80% da população nos principais impérios da América e arruinado antigas estruturas e tradições sociais. A um custo enorme para os outros, os conquistadores realmente encontraram ouro e enriqueceram a si mesmos e suas sociedades de origem.

Na América, os conquistadores espanhóis encontraram mais do que ouro e prata: encontraram terras que poderiam ser usadas para cultivar plantas que produziam o açúcar, pelo qual o apetite europeu era enorme

e crescente. Os espanhóis (inclusive parentes de Colombo) já haviam mostrado como produzir açúcar barato nas ilhas Canárias, onde era cultivado em plantações trabalhadas por escravos. Essas plantações deram uma prévia dos lucros que seriam auferidos na América, muitas vezes usando a violência mais brutal.

Na década de 1540, em Potosí, na moderna Bolívia, mercadores espanhóis encontraram uma montanha de prata. No início, exploraram-na usando sistemas tradicionais de trabalho forçado herdados dos incas. Mas as taxas de mortalidade eram tão altas que logo começaram a usar escravos importados da África. Tropas de mulas levavam a prata para o porto mexicano de Acapulco, onde era convertida em pesos de prata, a primeira moeda global do mundo. Muitos pesos fluíram através do Atlântico para a Europa, onde impulsionaram as economias locais, pois o governo espanhol os utilizava para pagar dívidas a credores holandeses ou alemães. Os pesos também viajaram pelo Pacífico em galeões até Manila, cidade controlada pelos espanhóis. Lá, mercadores e oficiais espanhóis os trocavam com comerciantes chineses por sedas, porcelanas e outros produtos, os quais eram revendidos na América e na Europa com enormes lucros. Tratava-se da negociação clássica de arbitragem. Os mercadores compravam onde os produtos eram mais baratos e vendiam onde eles eram mais caros, e auferiam lucros enormes porque a diferença entre custos de produção e preços de venda podia ser extremamente ampla nos primeiros mercados globais do mundo. A economia chinesa em expansão precisava de prata e a valorizava muito, e assim a prata valia na China o dobro do seu valor na Europa, e o trabalho escravo na América mantinha baixos os custos de produção. Por outro lado, a seda de alta qualidade era comum na China, mas rara e imensamente valiosa na Europa.

Desde que seus navios evitassem naufrágios e piratas, os mercadores europeus e seus patrocinadores poderiam obter enormes lucros explorando os enormes gradientes de preços nas primeiras redes globais de intercâmbio. O que os portugueses e os espanhóis começaram, os holandeses e os ingleses continuaram no século XVII, quando se apoderaram dos fortes portugueses na Ásia e começaram a mordiscar as colônias espanholas e portuguesas no Caribe e na América do Norte.

As informações fluíam por esses gradientes junto com a riqueza, e elas se revelariam igualmente importantes. A invenção de novas formas eficientes de impressão por Johannes Gutenberg em meados do século XV ampliou o impacto dos novos fluxos de informação. Quase 13 milhões de livros foram publicados entre 1450 e 1500, e mais de 300 milhões entre 1700 e 1750.<sup>5</sup> Os livros — e as informações que eles armazenavam — deixavam de ser um luxo raro e caro e se tornavam uma aquisição cotidiana para pessoas com instrução. E, assim como os lucros da arbitragem estimularam o comércio europeu, novos e enormes fluxos de informação estimularam a ciência e a tecnologia europeias.

Os navegantes europeus encontraram novos continentes e ilhas, viram novas constelações nos céus do sul e encontraram povos, religiões, Estados, plantas e animais nunca mencionados em textos antigos. O tsunami de novas informações abalou a educação, a ciência e até mesmo a religião em toda a Europa, porque era essa a região através da qual as novas informações fluíam primeiro e com mais rapidez. Essas informações forçaram os estudiosos europeus a questionar a ciência antiga e até mesmo a Bíblia. Elas começaram a minar histórias tradicionais das origens. Na Inglaterra do século XVI, Francis Bacon afirmou que a ciência e a filosofia não deveriam mais se basear principalmente em textos antigos, mas precisavam procurar ativamente

novos conhecimentos, como os navegadores europeus: “Graças às viagens mais distantes que se tornaram frequentes em nossos tempos, abriram-se e descobriram-se muitas coisas da natureza, o que pode deixar entrar uma nova luz sobre a filosofia”.<sup>6</sup> Em 1661, Joseph Glanvill escreveu: “Há uma *América* de segredos e [um] *Peru* desconhecido de natureza” esperando para serem descobertos.<sup>7</sup>

Como diz o historiador moderno da revolução científica David Wootton, “a ideia de descoberta é [...] uma pré-condição para a invenção da ciência”.<sup>8</sup> Estude o mundo em si e não o que foi *dito* sobre o mundo. Aprenda como “conquistar a natureza, obedecendo a ela”, como disse Bacon. Isso estava muito presente no espírito manipulador da ciência e da tecnologia modernas. No século XVII, muitos estudiosos começaram a compreender que estavam vivendo uma revolução tanto intelectual quanto geográfica e comercial e que os novos conhecimentos aumentavam o poder do homem sobre o mundo natural. “Quanto ao nosso trabalho, estamos todos bem de acordo”, escreveu um membro da Sociedade Real de Londres para o Avanço do Conhecimento da Natureza em 1674, “[...] que não é branquear as paredes de uma casa antiga, mas construir uma nova.”<sup>9</sup> No século XVIII, os pensadores europeus da era iluminista começaram a ver propósito, significado e “progresso” nos novos conhecimentos. A ideia de que os seres humanos deveriam transformar e “aperfeiçoar” o mundo começou a moldar a ciência, a ética, a economia, a filosofia, o comércio e a política.

O mundo do pensamento transformou-se. David Wootton descreve a mudança em termos vívidos. Na época de Shakespeare, até mesmo os europeus mais instruídos acreditavam geralmente em magia e feitiçaria, em lobisomens e unicórnios; eles acreditavam que a Terra permanecia parada e os céus giravam em torno dela; que os cometas prenunciavam o

mal; que a forma de uma planta anunciava seus poderes medicinais porque Deus a projetara para ser interpretável; que a Odisseia era uma história verdadeira.<sup>10</sup> Um século e meio depois, quando Voltaire estava vivo, os europeus cultos pensavam de maneira muito diferente. Muitos colecionavam ou liam sobre instrumentos experimentais como telescópios, microscópios e bombas de ar; consideravam Newton o maior dos cientistas; sabiam que a Terra girava em torno do Sol; não levavam a sério a magia, as histórias contadas em lendas antigas, as histórias de unicórnios ou (a maioria) das histórias de milagres; acreditavam no avanço do conhecimento e em algo como o progresso.

As novas informações forneceram os tijolos e a argamassa intelectuais para novos tipos de conhecimento. Quando desenvolveu suas leis da gravidade, Isaac Newton teve acesso a uma gama de informações sem precedentes. Ele poderia, por exemplo, comparar como os pêndulos balançavam em Paris, na América e na África. Nenhuma geração anterior de cientistas poderia ter testado suas ideias de forma tão completa ou em redes tão amplas e variadas de informações.

O feito de Newton pode ser ligado ao vasto aumento do conhecimento geral que o comércio e a exploração ultramarinos trouxeram para os europeus. A coragem de generalizar, de chegar a universais sobre o mundo natural, deve muito à imensa quantidade de informação — e autoconfiança — que o domínio europeu dos grandes mares deu a pensadores presos à terra, como Isaac Newton.<sup>11</sup>

Os novos fluxos deslumbrantes de riqueza e informação tiveram um efeito mais poderoso: estimularam as formas comerciais de mobilização, com frequência chamadas de *capitalismo*, que foram impulsionadas por gradientes de riqueza e informação. Em sua maioria, os governantes tradicionais haviam mobilizado riqueza com a ameaça de coerção, a promessa de proteção e apelos às autoridades religiosas e legais. Mas, em

todas as civilizações, os mercadores também mobilizaram muita riqueza através do comércio. A mobilização comercial dependia de arbitragem, de comprar barato em uma região e vender caro em outro lugar. Para terem sucesso, os mercadores precisavam de riqueza para investir e informações sobre em que investi-la. Os gradientes de riqueza e informação nas primeiras redes de intercâmbio global abriram oportunidades comerciais tão vastas para comerciantes e empresários europeus que a riqueza e a influência política deles aumentaram até o ponto em que mesmo imperadores, como Carlos V do Sacro Império Romano, começaram a pedir dinheiro emprestado aos mercadores.

Os governantes europeus eram geralmente mais chegados em trabalhar com os mercadores do que os governantes tradicionais, como os imperadores Ming da China, porque a maioria dos países europeus tinha recursos modestos, travava guerras sem fim e estava constantemente sem dinheiro. E os governantes que tomavam emprestado dos mercadores estavam naturalmente ansiosos para apoiar o comércio. Dessa forma, surgiu uma estreita relação simbiótica entre os comerciantes e os governantes europeus. Os governantes protegiam e apoiavam o comércio e, em contrapartida, obtinham o direito de tributar e lucrar com a riqueza comercial. Essa foi a forma mais antiga e rudimentar do capitalismo, um sistema admirado pelos economistas europeus de Adam Smith a Karl Marx.

A parceria emergente entre governos europeus e empreendedores assumiu muitas formas. O comércio russo de vodca é um bom exemplo.<sup>12</sup> A destilação apareceu na Rússia no século XVI. Quase imediatamente, funcionários do governo de Ivan, o Terrível (cujo apelido se refere ao tratamento brutal que dava a seus próprios nobres), perceberam que, se conseguissem impedir os camponeses de destilarem

em casa (o que não era difícil de implantar, porque a destilação exigia muito de habilidade e equipamento), poderiam ganhar muito dinheiro, pois a bebida seria um dos poucos bens que os camponeses teriam de comprar de outros. Tratava-se de uma poderosa substância que alterava a mente das pessoas e que logo se tornou obrigatória para os camponeses, que a utilizavam para celebrar os grandes festivais religiosos e familiares, bem como casamentos e funerais. Mas levar a vodca para milhares de aldeias espalhadas por uma grande área era uma tarefa complicada e mais adequada para comerciantes. Assim, em parceria com seus mercadores, o governo russo montou um comércio de vodca tão lucrativo que, no século XIX, pagava a maior parte do custo do Exército russo, então um dos maiores do mundo. Os governos e a sociedade russos pagaram uma taxa significativa de entropia pelas complexas injeções de receita do comércio de vodca, as quais acabaram por levar a níveis elevados e perigosos de alcoolismo.

Embora o capitalismo gerasse novas formas de desigualdade, os economistas o admiravam porque ele também era bom em gerar riqueza e inovação. Muitos dos primeiros economistas entenderam perfeitamente bem que a riqueza negociada e gerada pelos capitalistas representava realmente o controle da luz solar comprimida, dos fluxos de energia através da biosfera. É por isso que muitos subscreveram uma teoria do valor do trabalho: trabalho, afinal, era energia. Mas eles também compreenderam que o capitalismo era particularmente bom em incentivar a inovação no controle da energia. Isso porque os mercadores, ao contrário dos governantes tradicionais, raramente podiam usar a força pura para obter riqueza (embora ficassem felizes em fazê-lo se tivessem a chance). Em geral, os mercadores tinham de usar astúcia em vez de força. Isso significava procurar novas informações. Eles

precisavam encontrar novas mercadorias e mercados, além de negociar com eficiência e cortar custos. Acima de tudo, tinham de inovar se quisessem superar seus rivais. Tinham de encontrar novas formas de mobilizar e controlar os fluxos de energia e recursos. Isso ajuda a explicar por que as sociedades cada vez mais capitalistas da Europa se tornaram mais ricas e mais inovadoras nos séculos após Colombo ter cruzado o Atlântico pela primeira vez.

Alguns governos, como o da Holanda ou o de Veneza, eram comandados por mercadores e, por isso, levavam o comércio muito a sério. Os britânicos aprenderam muito com os holandeses e, por um breve período, no final do século XVII, até tiveram um rei holandês, Guilherme III. Os governos britânicos gastaram enormes quantias em uma Marinha que pudesse proteger as bases comerciais fortificadas e colônias no Caribe, na América do Norte e, por fim, na Índia. Com proteção naval, os governos e comerciantes britânicos obtiveram lucros enormes. Por exemplo: eles vendiam armas a governantes africanos em troca de escravos, que transportavam para a América em condições estupefacentes. Os escravos eram trocados por açúcar, tabaco e outros bens agrícolas, cujos preços eram baixos porque o trabalho escravo era barato. Isso significava que os bens agrícolas poderiam ser vendidos de forma barata e lucrativa nos mercados consumidores da Inglaterra e da Europa, em rápida expansão. O governo britânico, assim como o holandês, tornou-se cada vez mais dependente das receitas do comércio, incluindo pagamentos alfandegários. Isso ajuda a explicar por que, em 1694, o governo criou o Banco da Inglaterra para disponibilizar empréstimos baratos a mercadores, empresários e proprietários de terras britânicos. No século XVIII, os empréstimos baratos incentivaram a inovação agrícola e ajudaram a construir canais e um extenso sistema de

transporte de carruagens. Londres tornou-se uma das maiores cidades do mundo e o comércio britânico prosperou.

Novos fluxos de riqueza e informação e novas formas de conhecimento científico estimularam a inovação na agricultura, na mineração, na construção naval e navegação, na construção de canais e em muitas outras áreas. Isso aconteceu principalmente na Europa ocidental. Depois de 1500, riqueza e poder começaram a mudar com rapidez, e os antigos cafundós da Europa e da região do Atlântico logo se tornaram um novo centro, o dos primeiros fluxos globais de riqueza, informação e poder.

## COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS: UMA MEGAINOVAÇÃO

Um mundo globalizado e uma classe empresarial cada vez mais rica e poderosa apoiada por governantes locais estimularam o comércio e a inovação, particularmente na região do Atlântico. Mas, como vimos, algumas inovações são mais transformadoras do que outras. Tendo em vista a crescente riqueza da Europa, seu dinamismo empresarial e os fluxos de informação, não surpreende que as megainovações que criariam o mundo moderno surgiram ali, e não nas regiões centrais mais antigas que cobriam toda a Eurásia, desde o Mediterrâneo até o mundo muçulmano e a China.

As megainovações mais importantes foram, em geral, aquelas que liberavam novos fluxos de energia, como a fusão ou a fotossíntese. A agropecuária conta como uma megainovação porque permite que os agricultores tenham acesso a maiores parcelas de fluxos de energia da recente fotossíntese. Esses fluxos crescentes impulsionaram as mudanças turbulentas da era agrária. Mas havia limites para os fluxos de energia da agricultura, porque ela só usava a luz solar capturada recentemente. Ao queimar uma tora de lenha, comer uma cenoura ou usar um cavalo para arar, estamos aproveitando os fluxos de energia captados da luz solar nos últimos doze meses ou, no máximo, nas últimas décadas. No final do século XVIII, alguns economistas da Europa ocidental começaram a suspeitar que as sociedades europeias estavam explorando esses fluxos ao máximo. Seus cálculos eram simples. Os fluxos de energia que impulsionavam as sociedades humanas vinham de terras agrícolas e florestas, com um pequeno bônus do vento e da chuva. Portanto, crescimento significava encontrar mais terras aráveis e florestas. Em

1800, parecia que a maioria das terras cultiváveis já estava sendo explorada. Adam Smith, o fundador da economia moderna, argumentou que as sociedades logo usariam toda a energia disponível. Então o crescimento iria parar; os salários cairiam, e assim também as populações quando as sociedades agrícolas se defrontassem com os limites dos fluxos de energia que todos os outros organismos encaram quando já preencheram seu nicho.<sup>13</sup> Algumas sociedades, como a Holanda e a Inglaterra, já pareciam ter atingido esses limites. Na Holanda, os agricultores tiveram que arrancar terras agrícolas do mar, enquanto a Inglaterra enfrentava uma crescente escassez de madeira para aquecimento, habitação e construção naval. Como Alfred Crosby diz, na época de Adam Smith “a humanidade atingira um teto em sua utilização da energia solar”.<sup>14</sup>

A pressão para encontrar novas fontes de energia acabaria por fazer surgir as megainovações que chamamos hoje de revolução dos combustíveis fósseis. Ela deu aos humanos acesso a fluxos de energia muito maiores do que aqueles propiciados pela agricultura — a energia encerrada nos combustíveis fósseis, que não se acumulara em poucas décadas, mas desde o período carbonífero, havia mais de 360 milhões de anos. Nas camadas de carvão, petróleo e gás havia várias centenas de milhões de anos de luz solar enterrada em formas sólidas, líquidas e gasosas. Para ter uma ideia das energias encerradas nos combustíveis fósseis, imagine carregar um carro cheio de passageiros em cima de sua cabeça e correr muito, muito rápido por várias horas, e então lembre-se de que alguns litros de gasolina têm essa energia e muito mais (porque muita energia é desperdiçada). Tal como uma descoberta de ouro, essa bonança energética gerou novas formas de mudança frenéticas e muitas vezes caóticas, e criou e destruiu as fortunas de indivíduos, países e

regiões inteiras. Charles Dickens, Friedrich Engels e outros viram o preço terrível que muitos pagaram por essas mudanças. Mas do frenesi emergiria um mundo inteiramente novo.

As transformações começaram com avanços tecnológicos que convertiam a energia do carvão em energia mecânica barata que podia alimentar fábricas, locomotivas, navios a vapor e turbinas. Muitas sociedades já conheciam o carvão, difícil de minerar e transportar e sujo e fedorento quando queimado. Assim, a maioria das pessoas nas sociedades agrárias preferia obter sua energia térmica da madeira. Em algumas regiões, no entanto, a madeira era escassa. Na Inglaterra, à medida que as populações cresciam, suas cidades se expandiam (particularmente Londres) e o comércio crescia, e a demanda por energia começou a superar os estoques. A Inglaterra foi um dos primeiros países do mundo a sentir o aperto energético. Mas, ao contrário da maioria dos países, ela tinha uma saída alternativa: vastas reservas de carvão bem próximas à superfície, grande parte delas perto de rios ou da costa, que podiam ser transportadas de forma barata e fácil por via marítima ou por canais até as grandes cidades, inclusive Londres. As fábricas e os lares ingleses começaram a adotar o carvão. No século XVII, cervejeiros, fabricantes de tijolos e padeiros ingleses já usavam carvão, e os londrinos começaram a reclamar do ar sujo da cidade. Em 1700, o carvão já produzia 50% da energia inglesa. Em 1750, forneceria tanta energia quanto 4 milhões de hectares de floresta — o equivalente a quase 15% da área da Inglaterra e do País de Gales.<sup>15</sup> A dependência do carvão incentivou aqueles que o extraíam, transportavam e vendiam a produzir mais carvão — e a produzi-lo mais barato.

Mas havia um problema. Com o aumento da demanda, os mineradores de carvão tiveram de cavar minas mais profundas, que logo

se encheram de água, de modo que a obtenção de mais carvão dependia da construção de bombas eficientes para drenar as minas. Na Inglaterra, os incentivos para resolver esse problema tecnológico eram maiores do que em qualquer outro lugar, e criar bombas baratas e eficientes tornou-se uma meta importante para empreendedores e inventores. A combinação de ciência nova e habilidades mecânicas disseminadas propiciou o pano de fundo intelectual necessário para resolver o problema. Os cientistas do século XVII haviam começado a entender como a pressão atmosférica funcionava e, no início do século XVIII, esse conhecimento foi posto em prática nos motores a vapor de Newcomen para bombear água das minas de carvão.<sup>16</sup> Mas o motor a vapor de Newcomen era ineficiente e usava enormes quantidades de carvão, por isso fazia sentido comercial somente em minas de carvão, onde o produto era barato. Investidores, inventores e engenheiros compreenderam que melhores bombas poderiam gerar enormes lucros e revolucionar o fornecimento de carvão para residências e indústrias inglesas.

James Watt, o engenheiro que resolveu esses problemas técnicos, era um fabricante de instrumentos escocês, bem conectado a engenheiros, cientistas e empresários. Em 1765, durante um passeio dominical vespertino, Watt descobriu subitamente que poderia tornar o motor de Newcomen mais eficiente com o acréscimo de um segundo cilindro que funcionasse como um condensador. Mas construir um motor a vapor aperfeiçoado envolvia ciência e tecnologia de ponta e a capacidade de projetar e perfurar pistões construídos com precisão que pudessem suportar altas pressões. A tarefa era difícil e cara. No entanto, Matthew Boulton, o principal patrocinador de Watt, farejou uma boa oportunidade e investiu pesado na pesquisa dele. Boulton entendeu os

enormes lucros que poderiam ser obtidos de uma máquina que transformava a energia do carvão em energia mecânica a um custo razoável. Em 1769, quando Watt adquiriu a primeira patente de seu projeto, a competição era tão intensa que, depois de Boulton se gabar dos protótipos de seu engenheiro para o embaixador russo em Londres, Watt recebeu uma lucrativa oferta de trabalho do governo russo. Ele considerou seriamente aceitar a oferta, mas Boulton persuadiu-o a ficar. Em 1776, o trabalho estava concluído.

O motor a vapor de James Watt deu uma primeira amostra de fluxos de energia tão vastos que transformariam as sociedades humanas em apenas dois séculos. Assim como as energias de ativação que dão início às reações químicas, a energia dos combustíveis fósseis forneceu um pulso de energia que deu início ao equivalente tecnológico de uma reação em cadeia global. Em 25 anos, quinhentas das novas máquinas estavam em operação na Inglaterra, e, na década de 1830, as máquinas a vapor movidas a carvão já eram a principal fonte de energia na indústria britânica. O consumo inglês de energia disparou. Em 1850, a Inglaterra e o País de Gales consumiam nove vezes mais energia do que a Itália, e os empresários e as fábricas inglesas tinham acesso a forças motoras de energia colossal. As locomotivas a vapor podiam gerar 200 mil watts de energia (sim, James Watt deu seu nome à unidade de potência), ou cerca de duzentas vezes a energia fornecida por uma junta de dois cavalos de um arado, uma das principais forças motoras da era agrária. Havia mais energia barata disponível do que nunca. A indústria inglesa decolou. O carvão estava gerando tanta energia quanta poderia ser extraída de florestas que cobrissem 150% da área da Inglaterra e do País de Gales.<sup>17</sup>

## OS COMEÇOS DA INDUSTRIALIZAÇÃO

A Inglaterra foi o primeiro país a se beneficiar da bonança energética dos combustíveis fósseis e a produção disparou. Em meados do século XIX, o país produzia um quinto do PIB (produto interno bruto) mundial e cerca de metade das emissões globais de combustíveis fósseis. Não surpreende que os níveis globais de dióxido de carbono atmosférico começassem a subir a partir de meados do século XIX. Já em 1896, o químico sueco Svante Arrhenius reconhecia que o dióxido de carbono era um gás de efeito estufa e que estava sendo gerado em quantidades suficientes para começar a mudar o clima global.

Mas esse temor pertencia ao futuro. (Na verdade, Arrhenius achava que o aquecimento global era um acontecimento positivo, porque poderia prevenir uma nova era glacial.) Enquanto isso, empresários e governos de outros países queriam participar da bonança de energia barata e tentavam mendigar, tomar emprestada ou roubar a nova tecnologia. Em breve, máquinas a vapor passaram a ser construídas na Europa e nos Estados Unidos recém-independentes. Ao se disseminarem, elas estimularam ondas de novas tecnologias inovadoras, como a locomotiva e o navio a vapor, que baratearam o transporte e deram origem a inovações relacionadas, em particular na fabricação de ferro e aço para material rodante, cascos de navio e trilhos. Empreendedores, engenheiros e cientistas pesquisaram novas formas de explorar a energia barata de motores a vapor na construção e na fabricação de têxteis.

Houve muitos ciclos de feedback poderosos. Os motores a vapor aperfeiçoados possibilitaram o acesso a minas mais profundas, o que reduziu o custo da extração de carvão; desse modo, a quantidade de

carvão extraída aumentou 55 vezes entre 1800 e 1900. O carvão mais barato tornou os motores a vapor mais econômicos, enquanto navios e locomotivas a vapor reduziam o custo do transporte de gado, carvão, produtos agrícolas e pessoas por terra e mar, o que estimulou o comércio global. As ferrovias aumentaram a demanda por ferro e aço, e inovações na produção de aço tornaram pela primeira vez econômico usar aço em bens produzidos em massa, como latas de estanho, uma nova maneira de armazenar e preservar alimentos. Aconteceram efeitos colaterais inesperados. O uso de vapor para fiar e tecer têxteis aumentou a demanda por algodão cru, o que estimulou o plantio de algodão nos Estados Unidos, na Ásia central e no Egito. A produção industrial de têxteis aumentou a demanda por produtos derivados, como corantes e alvejantes artificiais, que deram início à moderna indústria química, muitos dos quais derivados do carvão.

A energia barata incentivou a experimentação e o investimento em muitas novas tecnologias. Uma das mais importantes foi a eletricidade. Na década de 1820, Michael Faraday percebeu que era possível gerar uma corrente elétrica movendo uma bobina de metal dentro de um campo elétrico. A geração de eletricidade em larga escala tornou-se possível na década de 1860 com a invenção de geradores alimentados por motores a vapor. A eletricidade e os motores elétricos, assim como as bombas de prótons e as moléculas de ATP dos primeiros procariontes, proporcionaram novas formas eficientes de distribuir energia. Transformada em eletricidade, a energia podia ser enviada de forma barata para as fábricas e residências. As lâmpadas alteraram a vida doméstica e o trabalho na fábrica, transformando a noite em dia, e cidades, rodovias e portos começaram a iluminar-se à noite. A eletricidade também revolucionou as comunicações. No início do século

XIX, a maneira mais rápida de enviar uma mensagem por terra ainda era por correio a cavalo. O telégrafo, inventado em 1837, permitia a comunicação à velocidade da luz. No final do século XIX, telefones e rádios tornaram possível transmitir conversas de forma mais ou menos instantânea a grandes distâncias.

Novas tecnologias revolucionaram a guerra e os armamentos. Estradas de ferro e navios a vapor transportavam exércitos e armas mais rápido do que nunca. Em 1866, Alfred Nobel inventou a dinamite, um explosivo novo e poderoso. Somados a armas de mão e metralhadoras aprimoradas, os explosivos multiplicaram o poder de matar de cada soldado. O poder destrutivo das armas industriais ficou claro durante a Guerra de Secessão dos Estados Unidos, o primeiro conflito com uso de combustíveis fósseis, e navios de casco de ferro equipados com armas modernas transformaram a guerra naval, possibilitando que a Grã-Bretanha derrotasse as armadas da China imperial durante as guerras do ópio. No final do século XIX, sustentados pela riqueza, pelas tecnologias e pelos fluxos de energia da Revolução Industrial, os países da outrora atrasada Europa começaram a conquistar grande parte do mundo durante a era do imperialismo.

Múltiplos ciclos de feedback, resultantes, em última análise, de novos fluxos de energia barata, explicam o dinamismo extraordinário da Revolução Industrial e o rápido aumento da riqueza e do poder das primeiras regiões a se industrializarem. A energia barata possibilitou e estimulou a inovação e o investimento em país após país e em muitas áreas diferentes da manufatura e da indústria. A energia barata do carvão acabaria por estimular inovações que mobilizaram novas formas de energia de combustível fóssil do petróleo.

O petróleo, como o carvão, era familiar. Era extraído onde quer que se infiltrasse na superfície e usado para produzir betume, medicamentos e até mesmo armas incendiárias.<sup>18</sup> Em meados do século XIX, o petróleo, na forma de querosene, começou a ser usado para iluminação como alternativa ao óleo de baleia, cujo preço estava subindo devido aos excessos na caça aos cetáceos. Mas o óleo mineral tinha uma oferta limitada. Alguns suspeitavam que havia grandes quantidades subterrâneas profundas que poderiam ser exploradas com o uso de técnicas de perfuração importadas da China, onde brocas especiais haviam sido projetadas para extrair sal-gema. Com efeito, sabia-se que quem perfurava o solo em busca de sal às vezes encontrava petróleo. A primeira tentativa séria de perfurar o solo para achar petróleo foi realizada por Edwin Drake, na empobrecida vila de Titusville, na Pensilvânia, a partir de 1857. Em 27 de agosto de 1859, pouco antes de seus fundos acabarem, a equipe de perfuração de Drake atingiu o petróleo. Os prospectores se apressaram a comprar terras, e dentro de quinze meses havia 75 poços de petróleo em Titusville e nos arredores. “Eles regateiam preços em reivindicações e participações”, escreveu um visitante,

compram e vendem sítios, e falam da profundidade, do espetáculo ou do rendimento de poços etc. etc. Os que saem hoje contam aos outros sobre o poço que viram produzir cinquenta barris de petróleo puro por dia. [...] A história traz mais gente de volta amanhã. [...] Nunca houve uma colmeia de abelhas no momento de enxamear mais ativa ou fazendo um zumbido maior.<sup>19</sup>

Em 1861, perfuradores atingiram o primeiro poço de jorro abundante, que bombeava petróleo sob sua própria pressão, produzindo até mesmo uma explosão fatal quando o gás natural bombeado com o petróleo pegou fogo. A produção aumentou para 3 mil barris por dia.

Muita gente ganhou fortunas com o petróleo, mas não Edwin Drake, que morreu na pobreza em 1880, apesar de ter ajudado a iniciar o próximo capítulo da revolução dos combustíveis fósseis.

## 11. O Antropoceno: limiar 8

*Não estamos mais no Holoceno. Estamos no Antropoceno!*

Paul Crutzen, explosão emocional numa conferência,  
em 2000

*O homem coletor de alimento reaparece de forma incongruente como coletor de informação. Nesse papel, o homem eletrônico não é menos nômade do que seus ancestrais paleolíticos.*

Marshall McLuhan,  
*Os meios de comunicação como extensões do homem*

No século XX, nós, humanos, começamos a transformar nosso ambiente, nossas sociedades e até nós mesmos. Sem, de fato, pretendemos, introduzimos mudanças tão rápidas e tão imensas que nossa espécie se tornou o equivalente de uma nova força geológica. É por isso que muitos estudiosos começaram a afirmar que o planeta Terra entrou numa nova era geológica, a época do Antropoceno, ou a “era dos humanos”. É a primeira vez na história de 4 bilhões de anos da biosfera que uma única espécie biológica se tornou a força dominante da mudança. Em apenas um ou dois séculos, com base nos enormes fluxos de energia e nas notáveis inovações da revolução dos combustíveis fósseis, nos vimos no papel de pilotos planetários sem realmente saber

em quais instrumentos deveríamos prestar atenção, que botões deveríamos pressionar, ou onde estamos tentando pousar. Trata-se de um novo território para os seres humanos e para toda a biosfera.

## A GRANDE ACELERAÇÃO

Se nos afastarmos dos detalhes, a época do Antropoceno parece um drama com três atos principais até agora e muito mais mudanças ainda em andamento.

O primeiro ato começou em meados do século XIX, quando as tecnologias baseadas nos combustíveis fósseis começaram a transformar o mundo inteiro. Alguns países da região do Atlântico ganharam riqueza e poder colossais e novas armas de guerra aterrorizantes. Uma enorme distância se abriu entre as primeiras potências movidas a combustíveis fósseis e o resto do mundo. Essa disparidade de poder e riqueza duraria mais de um século e começaria a se encerrar somente no final do século XX.

Essas diferenças criaram o mundo imperial desigual do final do século XIX e início do século XX. De repente, países da região do Atlântico, que tinham sido marginais durante a maior parte da era agrária, começaram a dominar e, às vezes, governar boa parcela do mundo, inclusive a maior parte da África e um grande do território outrora governado pelos impérios asiáticos da Índia e da China. Fora da nova zona central do Atlântico, o primeiro impacto das tecnologias de combustíveis fósseis foi principalmente destrutivo, porque as novas tecnologias chegaram na bagagem militar de invasores estrangeiros. O *Nemesis*, primeiro navio de guerra a vapor com casco de ferro, com seus dezessete canhões e sua capacidade de navegar com rapidez em águas rasas, ajudou a Inglaterra a conquistar o controle dos portos da China durante a Primeira Guerra do Ópio, de 1839 a 1842. A Marinha chinesa, outrora a maior do mundo, não tinha defesa contra esse tipo de arma.

Em poucas décadas, o poder comercial e militar da Europa abalou Estados e modos de vida antigos. A produção têxtil com máquinas de fiação e tecelagem movidas a vapor arruinou os produtores têxteis artesanais da Índia, que havia sido a principal produtora de tecidos de algodão da era agrária. Quando conquistou o controle político e militar do subcontinente indiano, a Grã-Bretanha manteve esses desequilíbrios, impedindo que os tecidos indianos entrassem nos mercados britânicos. Até mesmo a construção das principais ferrovias da Índia beneficiou mais a Grã-Bretanha do que a Índia. A maior parte dos trilhos e do material rodante era de fabricação inglesa, e a enorme rede ferroviária indiana foi projetada principalmente para movimentar as tropas britânicas de forma rápida e barata, para exportar matérias-primas indianas baratas e para importar produtos manufaturados ingleses. Na América, na África e na Ásia, a crescente demanda por açúcar, algodão, borracha, chá e outras matérias-primas incentivou a instauração de plantações ambientalmente destrutivas, muitas vezes lavradas por mão de obra quase escrava. Nas guerras que colocaram metralhadoras contra lanças e azagaias, as potências europeias dividiram a África e mandaram nela durante a maior parte do século.

As conquistas econômicas, políticas e militares da Europa estimularam um sentimento de superioridade europeia ou ocidental, e muitos europeus começaram a ver suas conquistas como parte de uma missão europeia ou ocidental de civilizar e modernizar o resto do mundo. Para eles, a industrialização era um sinal de progresso. Fazia parte da missão transformadora, defendida primeiramente no Iluminismo, de “aprimorar” o mundo, torná-lo um lugar melhor, mais rico e mais civilizado para os seres humanos.

O segundo ato do Antropoceno foi excepcionalmente violento. Começou no final do século XIX e durou até meados do século XX. Durante esse ato, as primeiras potências movidas a combustíveis fósseis se voltaram umas contra as outras. No final do século XIX, Estados Unidos, França, Alemanha, Rússia e Japão começaram a desafiar a liderança industrial britânica. À medida que as rivalidades se intensificaram, as grandes potências tentaram proteger seus mercados e fontes de suprimento e afastar os concorrentes. O comércio internacional declinou. Em 1914, a rivalidade se transformou em guerra total. Por trinta anos, as destrutivas guerras globais mobilizaram as novas tecnologias, bem como a riqueza e as populações crescentes da era moderna.

Outras partes do mundo foram engolfadas por essas guerras, que foram travadas com brutalidade tanto na China e no Japão quanto na Rússia e na Alemanha. Enquanto a névoa vermelha da guerra caía sobre a Europa, a África, a Ásia e o Pacífico, os governos em guerra competiam para desenvolver armas mais destrutivas. A ciência deu aos combatentes novas armas terríveis, algumas das quais utilizavam as energias que se escondiam nos núcleos atômicos. Em 6 de agosto de 1945, um bombardeiro B-29 Superfortress dos Estados Unidos partiu das ilhas Marianas no Pacífico e lançou uma bomba atômica na cidade japonesa de Hiroshima. Destruiu grande parte da cidade e matou 80 mil pessoas. (Dentro de um ano, outras 70 mil morreram de ferimentos e radiação.) Em 9 de agosto de 1945, uma arma similar foi lançada na cidade de Nagasaki.

O terceiro ato abrange a segunda metade do século XX e o início do século XXI. Do banho de sangue das guerras mundiais, Estados Unidos e União Soviética emergiram como as primeiras superpotências globais.

Houve muitas guerras locais, na maioria voltadas para derrubar o domínio colonial europeu. Mas não houve mais grandes guerras internacionais durante a era da Guerra Fria. Todas as potências já entendiam que não haveria vencedores numa guerra nuclear. Mas houve alguns momentos em que a paz ficou por um triz. Logo após a crise dos mísseis em Cuba em 1962, o presidente John Kennedy admitiu que as probabilidades de uma guerra nuclear total foram “entre uma em três e uma em duas”.<sup>1</sup>

As quatro décadas após a Segunda Guerra Mundial testemunharam o surto mais notável de crescimento econômico na história da humanidade. Esse foi o período da Grande Aceleração.

O comércio global foi renovado e intensificado. Nos quarenta anos anteriores à Primeira Guerra Mundial, de acordo com uma estimativa influente, o comércio internacional aumentou em valor a uma taxa média de cerca de 3,4% ao ano; de 1914 a 1950, essa taxa caiu para apenas 0,9%; depois, de 1950 a 1973, aumentou cerca de 7,9% ao ano, antes de cair para cerca de 5,1% entre 1973 e 1998.<sup>2</sup> Em 1948, vinte nações assinaram o Acordo Geral sobre Comércio e Tarifas (GATT), que reduziu as barreiras ao comércio internacional. As tecnologias de guerra passaram a ser usadas para fins mais pacíficos. O petróleo e o gás natural contribuíram para a bonança energética do século XIX, assim como a energia nuclear, o equivalente pacífico das armas nucleares. A produtividade disparou, primeiro nas principais economias baseadas em combustíveis fósseis e, depois, em outros lugares. O consumo também cresceu à medida que a produção aumentava e os produtores buscaram novos mercados internos e externos. Em países mais ricos, foi a era do automóvel, da TV, das casas de sonhos dos subúrbios e, por fim, dos computadores, smartphones e internet. Uma nova classe média começou

a surgir. Foi também quando a revolução industrial começou a se espalhar para além dos antigos centros industriais. No início do século XXI, as tecnologias industriais já haviam transformado grande parte da Ásia, da América do Sul e de partes da África de forma tão completa e tão rápida quanto haviam transformado as sociedades europeias. À medida que outras áreas do mundo se industrializavam, sua riqueza e seu poderio aumentavam. No período de 250 anos desde o primeiro motor a vapor moderno, as tecnologias de combustível fóssil transformaram o planeta inteiro.

Durante a Grande Aceleração, os seres humanos mobilizaram energia e recursos numa escala tão sem precedentes que começaram a transformar a biosfera. É por isso que muitos estudiosos datam o alvorecer da época do Antropoceno em meados do século XX.

## A TRANSFORMAÇÃO DO MUNDO: TECNOLOGIA E CIÊNCIA

A inovação, impulsionada pela energia barata, foi o principal propulsor da mudança. As inovações criaram gradientes mais elevados de riqueza e poder que estimularam a competição, o que impulsionou a inovação, num poderoso ciclo de feedback. Empreendedores e governos foram atrás das inovações que poderiam dar-lhes vantagem industrial ou militar e investiram em negócios e cientistas, em escolas, universidades e institutos de pesquisa que poderiam gerar e disseminar novas tecnologias e habilidades.

As guerras do início do século XX levaram a uma marcha forçada da inovação. Durante a Primeira Guerra Mundial, a Alemanha ficou sem fertilizantes naturais, e os cientistas alemães, liderados por Fritz Haber e Carl Bosch, descobriram como tirar nitrogênio do ar para fazer fertilizantes artificiais. O nitrogênio não gosta de reagir, então isso não foi fácil. Os procariontes haviam resolvido o problema havia bilhões de anos, mas Haber e Bosch foram os primeiros organismos multicelulares a fixar com sucesso o nitrogênio atmosférico. O processo Haber-Bosch usa enormes quantidades de energia para superar a relutância do nitrogênio em se combinar quimicamente e, por isso, era viável somente em um mundo de combustíveis fósseis. Mas os fertilizantes artificiais à base de nitrogênio transformaram a agricultura, aumentaram a produtividade das terras cultiváveis em todo o mundo e tornaram possível alimentar vários bilhões de seres humanos a mais. Eles transformaram a energia do combustível fóssil em comida.

O combustível fóssil líquido chamado petróleo foi usado pela primeira vez no final do século XIX como substituto do óleo de baleia na

iluminação. Os primeiros motores de combustão interna, desenvolvidos nas décadas de 1860 e 1870, mostraram como gerar força mecânica a partir do óleo. Ao contrário do motor a vapor, cuja fonte de calor era externa às partes móveis do motor, nos motores de combustão interna o calor dos combustíveis fósseis movia diretamente os pistões, os rotores ou as pás das turbinas. Os motores de combustão interna se espalharam rapidamente no século XX, em grande medida devido ao seu uso durante a guerra para transportar soldados e equipamentos e para fornecer energia aos primeiros tanques. Eles também foram instalados na primeira aeronave militar a exercer a arte sombria de lançar explosivos do ar. Depois que as guerras terminaram, os fabricantes de automóveis e aviões se voltaram para os mercados civis para criar um mundo no qual cada vez mais indivíduos possuíssem e usassem carros ou voassem em aviões. O comércio global foi transformado por petroleiros, navios cargueiros e grandes aviões.

A informação está no coração das tecnologias do Antropoceno. As tecnologias da informação transformaram-se quando os governos investiram numa expansão enorme da educação e da pesquisa, e empresas financiaram pesquisas para desenvolver e disseminar novos produtos e serviços. Para decifrar os códigos dos inimigos, em época de guerra os governos financiaram as pesquisas em matemática da informação e computação. Essas pesquisas, combinadas com a invenção do transistor no final da década de 1940, lançaram as bases para a informatização da ciência, dos negócios, do governo, das finanças e da vida cotidiana na segunda metade do século. A engenharia espacial, também desenvolvida durante as guerras, acabaria por mandar seres humanos para o espaço. Os governos dos tempos de guerra haviam iniciado enormes programas de pesquisa para desenvolver armas

nucleares. O Projeto Manhattan, do governo americano, desenvolveu as primeiras bombas atômicas, inclusive aquelas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki em 1945. Essas bombas liberavam as energias da desintegração dos núcleos de urânio. A União Soviética logo desenvolveu suas próprias armas atômicas, ajudada por informações vazadas por espões do Projeto Manhattan. Dentro de uma década, Estados Unidos e União Soviética também construíram bombas de hidrogênio, que liberavam as energias muito maiores geradas pela fusão de prótons, o mesmo mecanismo que alimenta todas as estrelas. A primeira bomba H foi testada em 1952.

Grande parte dessas inovações foi inspirada em descobertas levadas a cabo no ambiente de aprendizado coletivo altamente energizado da ciência moderna. Albert Einstein desenvolveu sua teoria da relatividade nas duas primeiras décadas do século XX. Ele aprimorou a compreensão que Newton tinha do universo ao mostrar que matéria e energia curvavam o espaço e o tempo, e essa curvatura era a verdadeira fonte da gravidade. Einstein também mostrou que a matéria poderia ser convertida em energia, e esse insight forneceu as fundações científicas para as armas nucleares e a energia nuclear. A física quântica, desenvolvida na mesma época, deu uma visão mais profunda do mundo estranho e probabilístico dos núcleos atômicos. Sem esse entendimento, armas nucleares, transistores, sistemas de posicionamento global (GPS) e computadores modernos não existiriam hoje. Na década de 1920, astrônomos como Edwin Hubble encontraram a primeira prova de que nosso universo começou com um big bang. Em biologia, combinou-se a ideia de Darwin de seleção natural com a compreensão de Mendel da hereditariedade e com os métodos estatísticos aprimorados de R. A. Fisher para lançar as bases da genética moderna.

Esses e muitos outros novos insights e tecnologias impulsionaram a inovação e o crescimento durante a Grande Aceleração. O aumento da produtividade permitiu que as populações humanas crescessem mais rápido do que nunca. Em 1800, havia 900 milhões de habitantes na Terra. Em 1900, havia 1,5 bilhão. Em 1950, quando eu era criança, havia 2,5 bilhões de seres humanos, apesar das enormes baixas das guerras mundiais. Durante minha vida, o número de seres humanos aumentou em outros 5 bilhões. Essa quantidade enorme de gente pode entorpecer o cérebro, por isso vale a pena dedicar um tempo para entender o que isso significa. Nos duzentos anos decorridos desde 1800, o número de seres humanos aumentou em mais de 6 bilhões. Cada ser humano adicional precisava ser alimentado, vestido, alojado e empregado, e a maioria tinha que ser instruída. O desafio de produzir recursos suficientes em apenas duzentos anos para sustentar 6 bilhões de seres humanos adicionais foi colossal.

O notável é que esse desafio foi enfrentado com tecnologias modernas, combustíveis fósseis modernos e habilidades gerenciais modernas. A produtividade disparou na agricultura, na manufatura e nos transportes. Embora os alimentos e outros suprimentos nem sempre chegassem àqueles que precisavam deles, produziu-se comida suficiente para alimentar mais de 7 bilhões de pessoas. As mudanças cruciais aconteceram na produção de fertilizantes artificiais e pesticidas, no uso de máquinas agrícolas movidas a combustíveis fósseis, na construção de milhares de barragens de irrigação e na produção de novas culturas geneticamente modificadas. As modernas tecnologias agrícolas trouxeram novas terras para o cultivo, aumentando a área cultivada de meio bilhão de hectares em 1860 para quase três vezes mais em 1960.<sup>3</sup> Barcos pesqueiros equipados com poderosos motores a diesel, sonares e

redes enormes sugavam a maioria dos organismos nas áreas em que pescavam. A pesca aumentou de 19 milhões para 94 milhões de toneladas entre 1950 e 2000, embora a pesca excessiva signifique que muitos pesqueiros estão agora em perigo de colapso.

Tecnologias de informação aperfeiçoadas tornaram mais fácil acumular, armazenar, rastrear e usar as enormes quantidades de informação que impulsionaram a inovação e mantiveram em funcionamento as sociedades modernas extremamente complexas. As tecnologias de comunicação e transporte transformaram o aprendizado coletivo ao criar, pela primeira vez, uma única rede de mentes conectadas que abrangia o globo e podia gerir e rastrear novas informações em colossais armazenamentos eletrônicos de informações. A noosfera, a esfera da mente, tornou-se o motor dominante da mudança dentro da biosfera. Computadores em rede baratos, mas poderosos, deram a bilhões de pessoas acesso a mais informações do que poderiam encontrar em todas as bibliotecas do mundo pré-moderno. Quando combinados com as técnicas matematicamente sofisticadas da análise estatística moderna, os computadores possibilitaram que governos, bancos, corporações e indivíduos controlassem enormes fluxos de recursos. Eles também possibilitaram a comunicação instantânea entre indivíduos em qualquer lugar do mundo por meio de telegramas, telefones e internet. Se o compartilhamento de informações é o que faz os seres humanos tão poderosos, os computadores multiplicaram esse poder várias vezes. Como sempre, também houve perdas. Assim como as habilidades de memória provavelmente declinaram com a disseminação da escrita, as habilidades de cálculo diminuíram com a disseminação de computadores e calculadoras.

Em 2000, a revolução dos combustíveis fósseis já abarcava a maior parte do mundo, inclusive muitas regiões centrais mais antigas. As enormes distâncias na riqueza e no poder nacionais do final do século XIX começaram a diminuir. As potências europeias, enfraquecidas pelas guerras mundiais, abandonaram de má vontade suas colônias, e regiões centrais mais antigas da Ásia, do leste do Mediterrâneo, do norte da África e da América começaram a recuperar o atraso em tecnologia, riqueza e poder.

Por trás de todas essas mudanças estava a bonança da energia barata dos combustíveis fósseis. A produção de carvão aumentou em todos os lugares, mas também a produção de petróleo e gás natural. Novos campos de petróleo foram explorados na Arábia, no Irã, na União Soviética e até mesmo nas plataformas continentais. Em apenas 25 anos, somente no Oriente Médio, a produção de petróleo aumentou de 28 bilhões de barris em 1948 para 367 bilhões de barris em 1972. O gás natural foi essencial durante a Grande Aceleração. O consumo total de energia dobrou no século XIX e subiu dez vezes no século XX. O consumo humano de energia aumentou com muito mais rapidez do que as populações humanas.

## A TRANSFORMAÇÃO DO MUNDO: GOVERNANÇA E SOCIEDADE

A própria natureza da sociedade e do governo foi transformada pelos novos fluxos de energia e tecnologias do Antropoceno. Outrora, todos os humanos foram caçadores-coletores e “governo” significava, na verdade, relações familiares. Depois que a agricultura apareceu, cada vez mais pessoas passaram a viver em aldeias camponesas e se sustentar plantando. Nas sociedades agrárias, “governo” significava, acima de tudo, utilizar energia e recursos dos camponeses. Hoje, a maioria dos seres humanos nem faz coleta nem trabalha na terra para produzir sua comida e suprir outras necessidades. Eles se tornaram assalariados. Como os ceramistas da antiga Suméria, vivem de salários ganhos pelos trabalhos especializados. E isso transformou a natureza da governança, porque agora os governos têm de se envolver no dia a dia de todos os cidadãos. Isso porque os assalariados, ao contrário dos camponeses, não podem sobreviver sem governos. As aldeias agrícolas podiam existir muito felizes fora das fronteiras das grandes civilizações agrárias, mas os assalariados dependem da existência de leis, mercados, empregadores, lojas e moedas. Um assalariado especialista, como uma célula nervosa, não pode sobreviver sozinho. É por isso que um mundo de assalariados é muito mais integrado do que um mundo de camponeses. Os governos modernos regulamentam mercados e moedas, protegem as empresas que proporcionam empregos, criam sistemas educacionais de massa que podem disseminar a alfabetização para a maioria da população e fornecem a infraestrutura para o movimento de bens e trabalhadores. Para fazerem tudo isso, precisam atrair cada vez mais seus súditos para o trabalho de governança e administração.

Podemos ver a mudança para tipos modernos de governo no século XIX. Quando a industrialização decolou, cada vez mais camponeses se tornaram assalariados e os governos começaram a mobilizar mais de suas populações. A França revolucionária, transformada pela revolução e sob o ataque da maior parte da Europa, foi um dos primeiros Estados modernos a recrutar sistematicamente soldados de toda a população. O governo dos Estados Unidos também se forjou num período de guerra durante o qual teve de mobilizar grande parte da população. Para tanto, os governos precisavam de registros detalhados sobre o número de cidadãos, sobre sua saúde e boa forma, sobre sua educação, habilidades, riqueza e lealdade. São problemas que os governos mais tradicionais conseguiam ignorar. Os governos da França revolucionária e dos Estados Unidos começaram a mobilizar a lealdade de seus súditos através da democratização, que levou uma parte maior da população a trabalhar para o governo, e do nacionalismo, que apelou para o sentimento de uma comunidade nacional compartilhada. Eles ofereceram a um número cada vez maior de seus súditos (homens ricos, outros homens, e mulheres, nessa ordem) algum papel no governo por meio de eleições. Através das escolas e dos novos meios de comunicação em rápido desenvolvimento, os governos tentaram atingir a mente de seus súditos e gerar novas formas de lealdade. O nacionalismo mostrou ser uma maneira poderosa de unir pessoas com diferentes tradições, religiões e até idiomas. Ele mobilizou os instintos tradicionais de parentesco construindo na mente dos cidadãos uma vasta e imaginária família de milhões de pessoas a quem deviam lealdade, serviço e, nas crises extremas da guerra, talvez até mesmo a própria vida.

As guerras totais do início do século XX transformaram os governos em administradores econômicos que tentaram mobilizar todas as

peças e recursos das economias industriais modernas. Podemos rastrear mais ou menos a história do papel crescente do governo na gestão econômica. No final do século XIX, o governo francês respondia por cerca de 15% do PIB do país, uma medida bastante grosseira da produção nacional total. Na época, isso parecia muito: o governo da Grã-Bretanha e o dos Estados Unidos representavam menos de 10% de seu respectivo PIB. As guerras do início do século XX forçaram os governos a intervir mais ativamente na gestão da economia e, em meados do século XX, seu papel econômico já aumentara em toda parte. No início do século XXI, a participação média dos gastos nacionais controlados ou geridos pelos governos nos países da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico, fundada em 1960) era de 45% do PIB, e a maioria dos países mais ricos ficava na faixa de 30% a 55%.<sup>4</sup> Alguns governos, como os regimes comunistas da União Soviética e da China, tentaram gerenciar a economia nacional em seus mínimos detalhes. Os governos modernos também exerciam poder coercitivo em uma escala muito maior do que os governos tradicionais, através de exércitos e polícias equipados com armas modernas. Essa quantidade de poder seria inimaginável para o autor do *Arthashastra*, o antigo tratado indiano sobre a arte de governar. Os governos modernos têm escala, alcance, poder e peso que fazem com que mesmo os governos mais poderosos da era agrária se pareçam com pesos-pena.

Em um mundo cada vez mais interconectado, a governança também assumiu formas mais globais. No final do século XX, havia muitas estruturas políticas — ainda não eram governos — que geriam, aconselhavam e administravam em escala global. Entre elas estavam as Nações Unidas, o Fundo Monetário Internacional e um grande número de corporações e organizações não governamentais (ONGs), como a Cruz

Vermelha, cujas atividades abrangem muitos países diferentes. Essas instituições representam, em forma embrionária, um novo nível global de governança que seria inimaginável há apenas alguns séculos.

## NOVAS MANEIRAS DE VIVER E SER

As transformações tecnológicas e políticas foram acompanhadas por mudanças igualmente radicais no estilo de vida humano — na *experiência* da vida.

Os seres humanos modernos vivem de maneiras que teriam desconcertado, confundido e possivelmente aterrorizado nossos ancestrais. Todas as diversas atividades de uma família camponesa — arar, semear, colher, alimentar animais domésticos, ordenhar gado, cortar lenha, catar cogumelos ou ervas, parir e criar filhos, cozinhar os alimentos e tecer as fibras que se cultivavam — dominaram a vida da maioria das pessoas por milhares de anos. Hoje, a maioria dos agricultores é composta de empresários ou assalariados. Eles trabalham em enormes fazendas industriais especializadas em apenas algumas culturas, algumas delas geneticamente modificadas. Eles cultivam e transportam suas colheitas usando grande quantidade de fertilizantes e pesticidas e colheitadeiras, tratores e caminhões sedentos de energia. Os agricultores modernos não cultivam para comer, mas para vender. Eles administram empresas, tomam dinheiro emprestado de bancos e compram sementes, fertilizantes e tratores de grandes corporações.

A maioria das pessoas não vive mais em aldeias, mas em vilas e cidades. Longe dos campos, riachos e bosques da aldeia camponesa, vivem em ambientes quase inteiramente moldados pela atividade humana. À medida que diferentes empregos, habilidades e formas de expertise proliferam, as pessoas passam cada vez mais tempo aprendendo. A informação — conhecimento especializado — é o que conta, e não as habilidades gerais dos camponeses. Uma quantidade cada

vez maior de pessoas desfruta de níveis de nutrição e saúde que eram raros até um século atrás, graças à produtividade da agricultura moderna e aos modernos avanços da medicina e da assistência médica. A anestesia moderna acabou com a agonia das intervenções médicas mais tradicionais. (Para suportar uma amputação ou extração dentária não é mais preciso apelar para uma dose de bebida alcoólica.) O mais notável de tudo talvez seja que, em apenas um século, essas mudanças mais do que dobraram a expectativa de vida média dos seres humanos.

Apesar das guerras do século XX, as relações interpessoais também se tornaram, na maior parte, menos violentas. Há uma lógica clara nessa mudança, pois a coerção se tornou uma maneira menos eficaz de controlar o comportamento nos dois últimos séculos (quando você viu pela última vez um açoitamento público?), e as recompensas e punições econômicas tomaram lentamente o lugar dela (é provável que você já tenha *pedido* um aumento salarial). Embora hoje a maioria das pessoas dê por certo que a escravidão e a violência doméstica são erradas, é importante lembrar que, ainda no século XVIII, o tráfico de escravos continuava bastante respeitável na maior parte do mundo; a tortura e a execução eram punições comuns mesmo para pequenos delitos e amplamente consideradas uma forma de entretenimento público; e espancamentos ou castigos corporais eram vistos como uma maneira normal e perfeitamente aceitável de manter a ordem dentro das famílias e das escolas. A violência pessoal ainda é muito comum, mas, em relação ao número de pessoas existentes no mundo, é muito mais rara do que era e não é mais vista na maior parte do mundo como uma maneira aceitável de controlar o comportamento.

No mundo dos camponeses, a maioria vivia perto da subsistência, os períodos de escassez eram familiares e comuns, e a riqueza significava,

para a maioria das pessoas, um lar sólido, livre de dívidas, e dinheiro suficiente para pagar impostos, alimentar e vestir uma família. O mundo consumista de hoje é totalmente diferente. Ele é alimentado por sistemas econômicos que, nas partes mais ricas do mundo, produzem tanta riqueza material que sua própria sobrevivência depende do consumo enorme e sustentado de uma classe média global em rápido crescimento. A ideia de progresso, que a maioria de nós toma como garantida, também é nova. Durante a maior parte da história humana, as pessoas supunham que, exceto se ocorressem catástrofes, os filhos viveriam tanto quanto seus pais.

As atitudes em relação a famílias e filhos mudaram profundamente. Nos últimos séculos, a melhoria da nutrição e da assistência à saúde começou a reduzir a mortalidade infantil, fazendo com que mais crianças sobrevivessem até a idade adulta. Contudo, as atitudes camponesas tradicionais asseguravam que as famílias continuassem tentando produzir o maior número possível de filhos. Essas atitudes, somadas ao aumento da produção de alimentos, à alta fertilidade e ao declínio da mortalidade, ajudaram a promover o crescimento populacional extraordinariamente rápido dos últimos séculos. Mas as atitudes tradicionais começaram a mudar à medida que as famílias se mudavam para as cidades, que a criação e a educação dos filhos se tornavam mais caras e que mais crianças sobreviviam até a idade adulta. As famílias urbanas passaram a ter menos filhos e as taxas de fertilidade começaram a cair. A queda nas taxas de fertilidade após a queda anterior das taxas de mortalidade é o que os demógrafos chamam de *transição demográfica*: o surgimento de um novo regime demográfico de baixa fertilidade e baixa mortalidade. E isso explica por que, no século XX, as taxas de crescimento populacional começaram a desacelerar, primeiro

em países mais ricos e depois em todo o mundo. Também ajuda a explicar mudanças fundamentais nos papéis de gênero. A redução da pressão sobre as mulheres para que passassem toda a sua vida adulta parindo e criando filhos alterou as divisões tradicionais entre os papéis masculino e feminino e permitiu que as mulheres assumissem papéis dos quais foram excluídas durante a maior parte da era agrária.

Para qualquer pessoa de hoje, esses aspectos da vida moderna são familiares, embora o contraste com o mundo agora desaparecido do campesinato possa ser mais difícil de ser apreciado. Ainda mais difícil de entender é o aumento impressionante da complexidade das sociedades modernas, o modo como cada detalhe da sua vida está emaranhado em redes que envolvem milhões de outras pessoas que fornecem alimentos e empregos, saúde, educação, eletricidade, combustível para o seu carro, as roupas que você veste. Cada uma dessas cadeias de interconexão pode incluir milhares ou milhões de outros seres humanos conectados em redes de complexidade fabulosa. Em momentos ociosos nos aeroportos, gosto de tentar calcular quantas pessoas estão envolvidas no projeto de construção e manutenção de um Airbus 380 e em levá-lo de Sydney a Londres. Enfraqueça qualquer um desses elos, e nossos mundos podem desmoronar com terrível rapidez, como é evidente hoje nas partes do planeta onde as estruturas estatais entraram em colapso. Kautilya, o autor de *Arthashastra*, teria dito que os seres humanos nesses lugares vivem sob “a lei do peixe”.

## A TRANSFORMAÇÃO DA BIOSFERA

A revolução dos combustíveis fósseis e a Grande Aceleração não transformaram somente as sociedades humanas; também estão transformando a biosfera. As atividades dos seres humanos mudam a distribuição e o número de organismos vivos, alteram a química dos oceanos e da atmosfera, reorganizam paisagens e rios e desequilibram os antigos ciclos químicos que fazem circular nitrogênio, carbono, oxigênio e fósforo na biosfera.

Os pesquisadores levaram muito tempo para perceber que o impacto das atividades humanas é agora tão grande quanto o dos principais processos biogeoquímicos que mantêm a estabilidade da biosfera. Sem realmente entendermos o que estamos fazendo, estamos mexendo com os termostatos biosféricos que mantiveram a superfície da Terra dentro de temperaturas habitáveis por 4 bilhões de anos.

O carbono é fundamental para a química da vida, e sua distribuição na atmosfera, no mar e na crosta terrestre ajudou a determinar as temperaturas na superfície da Terra ao longo da história do planeta. Hoje, enquanto utilizamos a energia dos combustíveis fósseis, estamos bombeando enormes quantidades de dióxido de carbono de volta à atmosfera. Mas foi somente na década de 1950 que os cientistas consideraram seriamente o impacto que isso poderia ter no ciclo do carbono. Charles Keeling começou a medir os níveis de dióxido de carbono atmosférico no Havaí em 1958. Em poucos anos, descobriu que esses níveis estavam aumentando rapidamente. Antes da revolução dos combustíveis fósseis, as emissões humanas de dióxido de carbono não eram grandes o suficiente para afetá-los. Hoje, no entanto, as atividades

humanas estão liberando cerca de 10 mil megatons de dióxido de carbono na atmosfera a cada ano, e estima-se que, desde a Revolução Industrial, as emissões totais cheguem a cerca de 400 mil megatons de dióxido de carbono.<sup>5</sup> A significação dessas mudanças ficou clara quando os pesquisadores descobriram formas de medir os níveis de dióxido de carbono em centenas de milhares de anos. Um dos métodos mandava estudar núcleos de gelo, que contêm pequenas bolhas, presas ano a ano, que podem nos dizer a composição da atmosfera em escalas de tempo geológicas. Elas mostraram que, nos dois séculos decorridos desde a Revolução Industrial, os níveis de dióxido de carbono atmosférico aumentaram mais do que em qualquer outro momento em quase 1 milhão de anos.

As mudanças que Keeling observou eram reais, impressionantes, e estavam transformando o ciclo do carbono. O aumento dos níveis de dióxido de carbono significará climas mais quentes, e climas mais quentes significarão furacões, tempestades e correntes de vento mais fortes, além da elevação do nível dos oceanos, que inundarão cidades em baixas altitudes. Os efeitos persistirão por muitas gerações porque, uma vez liberado na atmosfera, o dióxido de carbono permanece lá por muito tempo. Mas ele não é o único gás de efeito estufa importante cujos níveis atmosféricos aumentaram em consequência das atividades humanas. Os níveis de metano aumentaram ainda mais rapidamente nos últimos dois séculos, impulsionados em grande parte pela disseminação do cultivo de arroz em campos inundados e pelo crescente número de animais domesticados. O metano é um gás de efeito estufa ainda mais poderoso, embora se decomponha mais rápido.

No final do século XX, os computadores permitiram que os cientistas do clima construíssem modelos cada vez mais sofisticados do provável

impacto dessas mudanças na atmosfera. Seus modelos sugerem que, dentro de algumas décadas, quando as emissões de gases de efeito estufa criarem um mundo mais quente, o derretimento das geleiras e das calotas de gelo aumentará o nível do mar, inundando muitas cidades costeiras, e o aumento da energia térmica e da evaporação provocará padrões climáticos mais erráticos, imprevisíveis e extremos que tornarão a agricultura mais difícil. Dentro de algumas décadas, os climas globais parecerão muito diferentes dos padrões relativamente estáveis do Holoceno. Como diz um climatólogo americano: “O clima é uma fera brava e o estamos cutucando com vara curta”.<sup>6</sup>

O nitrogênio é tão vital para a vida quanto o carbono. Em 1890, os impactos humanos no ciclo do nitrogênio eram insignificantes. A cada ano, os seres humanos extraíam cerca de quinze megatons de nitrogênio da atmosfera, principalmente através da agricultura, enquanto as plantas silvestres extraíam cerca de cem megatons, ou quase sete vezes mais. Cem anos depois, seres humanos e plantas trocaram de papéis. Em 1990, a área de terras cultivadas já havia aumentado a tal ponto que as plantas silvestres estavam extraindo apenas cerca de 89 megatons, enquanto a extração humana de nitrogênio através da produção agrícola e de fertilizantes tinha aumentado para 118 megatons.

Nosso impacto sobre outros grandes mamíferos também foi profundo. Em 1900, os mamíferos terrestres selvagens representavam o equivalente a cerca de dez megatons de biomassa de carbono. Os seres humanos já representavam cerca de treze megatons, enquanto os mamíferos domesticados — nossas vacas, cavalos, ovelhas e cabras — respondiam por impressionantes 35 megatons. No século seguinte, essas proporções ficariam ainda mais distorcidas. Em 2000, a biomassa total de mamíferos terrestres selvagens caíra para cerca de cinco megatons, enquanto a dos

humanos aumentara rapidamente (o que não surpreende, levando-se em conta o crescimento da população) para cerca de 55 megatons e a dos mamíferos domesticados para espantosos 129 megatons. Temos aqui um indicador poderoso do grau em que as atividades humanas em expansão eliminaram outras espécies de grandes animais, absorvendo cada vez mais os recursos da biosfera.

A questão é geral. A quantidade da maioria das espécies de animais e plantas que não são de valor imediato para os seres humanos está diminuindo. Esse declínio é tão rápido que alguns especulam que podemos estar testemunhando os estágios iniciais de outro evento de extinção em massa. O ritmo de extinção é agora centenas de vezes mais rápido do que nos últimos milhões de anos e se aproxima daquele do último evento de extinção em massa, há 65 milhões de anos. Nós, seres humanos, conseguimos até mesmo levar nossos parentes mais próximos à extinção, inclusive, provavelmente, nossos parentes hominínios, como os neandertais. Nossos parentes vivos mais próximos, chimpanzés, gorilas e orangotangos, estão perto da extinção na natureza selvagem.

A revolução dos combustíveis fósseis ampliou a escala dos impactos humanos em muitas outras áreas. A mineração, a construção de estradas e a expansão das cidades movimentam agora mais terra do que a erosão e a glaciação. Bombas a diesel sugam água fresca dos aquíferos com rapidez dez vezes maior que a dos fluxos naturais para reabastecê-la. Estamos produzindo minerais, rochas e formas de matéria que nunca existiram antes, como os plásticos (feitos a partir do petróleo e que agora se acumulam em aterros sanitários nas cidades e nos oceanos), o alumínio puro, o aço inoxidável e grandes quantidades de concreto, uma pedra feita pelo homem cuja fabricação é agora um dos principais contribuintes para as emissões de carbono. Uma proliferação de novas

substâncias assim não se via na Terra desde o surgimento de uma atmosfera dominada por oxigênio, há cerca de 2,4 bilhões de anos.<sup>7</sup>

Uma das mais terríveis dessas mudanças é o aumento da produtividade do armamento humano. Há poucos séculos, nossas armas mais letais eram lanças ou, talvez, catapultas que arremessavam pedras. Desde o final da era medieval, a revolução da pólvora, iniciada na China, nos deu mosquetes, rifles, canhões e granadas. A Segunda Guerra Mundial gerou armas que poderiam degradar a biosfera inteira em apenas algumas horas, armas com o poder destrutivo do asteroide que acabou com os dinossauros.

## MEDINDO A MUDANÇA NO ANTROPOCENO

Novos fluxos de informação e energia entrelaçaram seres humanos, animais e plantas, bem como as substâncias químicas da terra, dos mares e da atmosfera, em um único sistema construído principalmente para o benefício de nossa própria espécie. Esse sistema depende de enormes fluxos de energia de combustíveis fósseis. Podemos medir aproximadamente o impacto desses fluxos de energia no Antropoceno usando dados do apêndice estatístico.

A primeira coisa que se destaca é a enorme escala de mudança em séculos recentes. Nos últimos duzentos anos, a população humana (coluna B) aumentou de 900 milhões para mais de 6 bilhões. Isso equivale a acrescentar 26 bilhões de pessoas em mil anos, uma taxa de crescimento mil vezes mais rápida que a da era agrária, na qual, em média, cerca de 25 milhões de pessoas foram acrescentadas a cada milênio. Essas taxas de crescimento são insustentáveis e, nas últimas décadas, elas vêm se desacelerando. Não obstante, os números ilustram o impressionante impacto da revolução dos combustíveis fósseis sobre o crescimento populacional.

O rápido crescimento populacional dependeu de enormes aumentos na energia disponível para nossa espécie (coluna C). Nos 8 mil anos decorridos entre o fim da última era glacial e 2 mil anos atrás, o consumo de energia dos seres humanos aumentou cerca de setenta vezes. Em apenas duzentos anos, entre 1800 e 2000, o consumo total de energia aumentou cerca de 22 vezes, de 20 milhões de gigajoules (20 exajoules) para 52 milhões de gigajoules (520 exajoules). Esse crescimento é o

equivalente a um aumento de 2,5 mil exajoules a cada mil anos, uma taxa de crescimento 20 mil vezes mais rápida que na era agrária.

A bonança energética dos combustíveis fósseis, como a bonança energética da agricultura, pagou pelo crescimento da população, pelos impostos sobre complexidade exigidos pela entropia e, finalmente, pelo aumento dos padrões de vida, mas numa escala muito maior do que na era agrária. E, dessa vez, o aumento dos padrões de vida não se limitou a um décimo da população humana, mas se estendeu a uma classe média emergente muito maior.

Grande parte da bonança energética dos combustíveis fósseis pagou por um número crescente de seres humanos. Alimentou, vestiu e abrigou os 5 bilhões a 6 bilhões de pessoas que foram acrescentados à população mundial nos últimos dois séculos. Mas a bonança dos combustíveis fósseis era tão maior do que a da agricultura que sobrou muito mais para outros usos. Sabemos disso porque a coluna D mostra que a energia disponível por pessoa aumentou em quase oito vezes nos últimos mil anos, enquanto nos 8 mil anos decorridos entre o fim da era glacial e 2 mil anos atrás ela aumentara menos do que o dobro. Nos últimos duzentos anos, a população cresceu à velocidade da luz, mas os fluxos de energia cresceram ainda mais rapidamente.

Muita energia extra deve ter sido paga pelos impostos exigidos pela entropia de sociedades cada vez mais complexas. Grande parte dessa energia não fez nenhum trabalho produtivo ou foi dissipada em forma de calor, poluição, desperdício ou destruição da guerra. Ela estava fazendo o trabalho da entropia de degradar estruturas complexas. Não temos boas medidas das quantidades envolvidas, mas devem ser significativas. Depois, há os outros impostos sobre a complexidade, a energia e a riqueza que foram pagos pela infraestrutura das sociedades

globais de hoje. Nos últimos duzentos anos, o tamanho das maiores cidades aumentou de cerca de 1 milhão de habitantes (quantidade que mal havia mudado em 2 mil anos) para mais de 20 milhões (coluna F). Tendo em vista a infraestrutura de eletricidade, esgotos, estradas e transportes públicos necessária para uma cidade moderna e os desafios do policiamento e regulamentação das atividades de 20 milhões de pessoas em uma pequena área, é evidente que isso representa um salto quântico na complexidade social e tecnológica. Os impostos sobre a complexidade pagam pela construção e manutenção de edifícios, ônibus, trens e balsas, esgotos e estradas; eles pagam por coleta de lixo, rede elétrica, códigos legais, policiamento, prisões e tribunais, e ligações por navio, avião, trem e internet que conectam cidades do mundo inteiro em uma única rede. Sem esses vários sistemas, todos movidos por enormes fluxos de energia, as estruturas complexas de uma cidade moderna se desintegrariam rapidamente. E as cidades, por sua vez, estão ligadas por uma complexa infraestrutura de rodovias, leis e comunicações eletrônicas a centenas de milhares de cidades menores, aldeias e assentamentos isolados. Embora não tenhamos como medi-los com precisão, podemos ter certeza de que os impostos sobre a complexidade são responsáveis por uma grande parcela da energia dos combustíveis fósseis.

Mas a bonança dos combustíveis fósseis foi tão grande que sobrou muita energia para mais uma tarefa: melhorar o bem-estar humano. Como na era agrária, uma quantidade desproporcional da riqueza ainda sustenta uma elite minúscula, de modo que, como no passado, podemos alocar uma parcela significativa da bonança energética ao consumo da elite. Mas tão grande foi o aumento de energia e riqueza que, pela primeira vez na história humana, os níveis de consumo começaram a

aumentar para uma crescente classe média global de bilhões de pessoas, muito mais gente do que toda a população do mundo no final da era agrária. Thomas Piketty estima que, nos países europeus modernos, 40% da população controle entre 45% e 25% da riqueza nacional. O aparecimento dessa classe média foi um fenômeno novo na história humana. E cada vez mais pessoas estão entrando nessa nova classe média à medida que cai o número dos que vivem em extrema pobreza.

Paradoxalmente, aumentar a riqueza também significa aumentar a desigualdade e, mesmo quando a quantidade de pessoas que vivem acima da subsistência está aumentando, o número dos que vivem em extrema pobreza é maior do que nunca na história da humanidade. Thomas Piketty estima que, na maioria dos países modernos, os 10% mais ricos da população controlem entre 25% e 60% da riqueza nacional, enquanto os 50% mais pobres controlam não mais do que 15% a 30%. Isso representa um declínio na desigualdade em comparação com a época imediatamente anterior à Primeira Guerra Mundial. Mas, no início do século XXI, a desigualdade parece estar em ascensão novamente, e o enorme número de pessoas que vivem agora significa que, em termos absolutos, há muito mais pessoas vivendo em extrema pobreza hoje do que havia no passado. Em 2005, mais de 3 bilhões de pessoas (mais gente do que a população total do mundo em 1900) viviam com menos de 2,50 dólares por dia. A maioria das pessoas desse grupo viu poucos benefícios na revolução dos combustíveis fósseis e sofre com as condições de vida insalubres, sem higiene e precárias da primeira revolução industrial que foram descritas tão vividamente por Dickens e por Engels.

Não obstante, uma proporção crescente da população humana tem se beneficiado do aumento dos fluxos de energia e riqueza e está vivendo bem acima da subsistência. Esses fluxos elevaram os níveis de consumo e

também os níveis de nutrição e saúde para bilhões de pessoas. A medida que melhor capta essa mudança é provavelmente a expectativa de vida (coluna E). Durante a maior parte da história humana, a expectativa de vida ao nascer era inferior a trinta anos. O motivo disso não era que as pessoas não chegassem aos sessenta ou setenta anos, mas que muitas crianças morriam pequenas e muitos adultos morriam de traumas e infecções que não os teriam matado hoje. A expectativa de vida quase não mudou por 100 mil anos. Então, apenas nos últimos cem anos, a média de vida quase dobrou em todo o mundo porque os seres humanos adquiriram as informações e os recursos necessários para cuidar muito melhor dos jovens e idosos, alimentar mais pessoas e melhorar o tratamento e os cuidados dos doentes e feridos.

O contraste entre a bonança energética dos combustíveis fósseis e a da agricultura é impressionante. A bonança energética proveniente dos combustíveis fósseis foi tão imensa que, além dos gastos com a reprodução, a riqueza da elite, o desperdício e a infraestrutura para a complexidade, sobrou o suficiente para elevar os níveis de consumo e os padrões de vida de uma proporção crescente da humanidade. Foi uma transformação revolucionária. Ela ocorreu principalmente nos últimos cem anos e principalmente durante a Grande Aceleração da segunda metade do século XX.

Essa é a face do Antropoceno Bom (*bom* do ponto de vista humano). O Antropoceno Bom gerou vida melhor para bilhões de seres humanos comuns, pela primeira vez na história da humanidade. (Se você duvida da melhora, pense novamente em fazer uma cirurgia sem a anestesia moderna.)

Mas há também um Antropoceno Mau. O Antropoceno Mau consiste nas muitas mudanças que ameaçam as conquistas do Antropoceno Bom.

Primeiro, o Antropoceno Mau gerou enormes desigualdades. Apesar do aumento colossal da riqueza, milhões de pessoas continuam a viver em extrema pobreza. E, embora seja tentador pensar que o mundo moderno aboliu a escravidão, o Índice de Escravidão Global de 2016 estimou que mais de 45 milhões de seres humanos vivem hoje como escravos. O Antropoceno Mau não é apenas moralmente inaceitável. É também perigoso porque garante o conflito e, num mundo com armas nucleares, qualquer conflito importante pode ser catastrófico para a maioria da humanidade.

O Antropoceno Mau também ameaça reduzir a biodiversidade e minar o sistema climático estável dos últimos 10 mil anos. Os fluxos de energia e recursos que sustentam o aumento do consumo humano são agora tão grandes que empobrecem outras espécies e põem em risco as bases ecológicas sobre as quais a sociedade moderna é construída. No passado, os mineiros levavam canários para as minas de carvão a fim de detectar o monóxido de carbono. Hoje, o aumento dos níveis de dióxido de carbono, o declínio da biodiversidade e o derretimento das geleiras nos dizem que algo perigoso está acontecendo, e devemos prestar atenção.

O desafio que enfrentamos como espécie é bastante claro. Podemos preservar o melhor do Antropoceno Bom e evitar os perigos do Antropoceno Mau? Podemos distribuir a bonança antropocênica de energia e recursos de forma mais equitativa para evitar conflitos catastróficos? E podemos, como os primeiros organismos vivos, aprender como usar fluxos de recursos mais brandos e menores para isso? Podemos encontrar equivalentes globais das delicadas bombas de prótons usadas para alimentar todas as células vivas hoje? Ou continuaremos dependendo de fluxos de energia e recursos tão grandes

que acabarão por abalar as sociedades fantásticamente complexas que construímos nos últimos duzentos anos?

PARTE IV  
O FUTURO

## 12. Para onde vai tudo isso?

*É difícil fazer previsões, especialmente sobre o futuro.*

Atribuído a Yogi Berra

*Há muito tempo o homem esqueceu que a Terra lhe foi dada apenas em usufruto, não para consumo, menos ainda para desperdício irracional.*

Charles Perkins Marsh, *Man and Nature*

## JOGOS FUTUROS

Na introdução, encontramos o fantástico desfile heterogêneo de todas as coisas, com suas estrelas e serpentes, seus quarks e telefones celulares, todos marchando para o distante trovão de supernovas sob o olhar fixo, mas cansado, da entropia. Para onde vai essa procissão?

É estranho, mas poucos sistemas educacionais modernos gastam muito tempo ensinando sistematicamente sobre o futuro. Essa negligência é surpreendente, porque pensar no futuro é algo que todos os organismos inteligentes fazem, e nós, humanos, o fazemos melhor do que qualquer outra espécie. Quer pertença a humanos, quer a chimpanzés, o cérebro cria modelos simplificados do mundo como é neste momento. Ele também cria modelos de como o mundo pode mudar. O cérebro, como os corretores de valores e os climatologistas, está no ramo da modelagem de futuros. Ao fazer isso, ele alerta seu dono sobre a aproximação de possibilidades e perigos.

Hoje, nós, humanos, podemos jogar jogos futuros com habilidade fantástica e numa escala fantástica. Nossos modelos são ricos e poderosos porque a linguagem humana e o compartilhamento de informações nos permitem combinar bilhões de modelos individuais. Isso significa que podemos refinar, enriquecer e melhorar nossos modelos à medida que são complementados, ajustados e corrigidos por feedback e por novas informações de bilhões de outros seres humanos ao longo de muitas gerações. Os modelos atuais do mundo incorporam informações de todas as partes do planeta Terra. Nós os construímos utilizando o melhor da ciência moderna e os executamos em redes de computadores que podem reproduzir milhões de situações hipotéticas diferentes. “Se todas

as geleiras da Groenlândia descongelarem, o nível do mar subirá o suficiente para inundar Miami e Daca?” Eis uma pergunta que não poderíamos ter feito seriamente há cem anos. Hoje, respostas valiosas e cuidadosamente testadas para esse tipo de pergunta podem orientar decisões políticas que afetarão bilhões de pessoas, muitas das quais são jovens hoje ou ainda não nasceram. (E, sim, Miami e Daca seriam inundadas.)

Ou poderíamos fazer perguntas muito mais grandiosas sobre o futuro remoto, como: “A entropia vencerá? Será que ela acabará por destruir *todas* as estruturas e formas?”. Por acaso, temos algumas respostas bastante seguras para essas questões, porque em escalas cosmológicas estamos perguntando sobre tipos relativamente simples de mudanças. Estamos de volta aos complexos sistemas físicos do universo primordial. As respostas às questões cosmológicas sobre o futuro não podem nos dar muita orientação prática para hoje porque são eventos fantásticamente remotos no tempo. Mas podem dar forma à nossa história moderna das origens porque nos provocam com pistas sobre para onde tudo está indo. Elas talvez ofereçam uma compreensão profunda, e até uma sensação de conclusão, mas não de orientação.

Entre as escalas humana e cosmológica, há outra escala, de alguns milhares de anos. Como será a Terra daqui a 2 mil anos? E, por falar nisso, como serão os seres humanos? Ou espigas de milho, ou cidades ou colônias em Marte?<sup>1</sup> Curiosamente, essa escala intermediária é a mais difícil de modelar. As questões interessantes nessa escala dizem respeito a sistemas fantásticamente complexos, como a biosfera, e em 2 mil anos a árvore de possibilidades terá gerado tantos ramos que até mesmo os modelos computacionais mais poderosos não conseguem escolher o mais provável. Mas não é apenas o número de galhos que nos impede de

fazer isso. Como a física quântica mostrou, nas menores escalas, o universo não é determinista. Coisas inesperadas acontecem e, como o bater das asas de uma borboleta, elas podem se sobrepor em cadeias causais com poder suficiente para desviar o futuro em muitas direções possíveis. Portanto, há muita contingência à moda antiga. Hoje, nem nosso cérebro e tampouco os melhores modelos de computador podem levar em conta uma pandemia baseada em uma pequena mutação genética num vírus ou o impacto de uma explosão de supernova próxima, embora possamos estar próximos de prever um possível impacto de asteroide (conhecimento que os dinossauros adorariam ter possuído). Nessa escala intermediária, entramos no reino da ficção científica. As histórias que contamos sobre os próximos milênios são fascinantes, assustadoras e importantes. Mas não sabemos como decidir o que devemos levar a sério.

## O FUTURO HUMANO: A MISSÃO

Para nós, seres humanos, os próximos cem anos são realmente importantes. As coisas estão acontecendo tão rápido que, como o tempo em câmera lenta de um quase acidente, os detalhes do que fizermos nas próximas décadas terão enormes consequências para nós e para a biosfera em escalas de milhares de anos. Gostemos ou não, estamos administrando uma biosfera inteira, e podemos fazer isso bem ou mal.

Mitos de todos os tipos podem nos dizer muito sobre como enfrentar um futuro imprevisível, porque eles estão cheios de histórias sobre quase acidentes, fracassos catastróficos e missões que tiveram sucesso. O que há de novo hoje é a possibilidade de um acidente que envolveria 7 bilhões de pessoas, tendo milhões de outros organismos como espectadores e vítimas. Desse modo, os seres humanos modernos, como os heróis e as heroínas de todos os bons mitos, têm uma tarefa, a de evitar o acidente e chegar a um bom lugar tanto para os seres humanos quanto para a biosfera, porque sabemos que não há lugar bom para nós numa biosfera arruinada.

Nos melhores mitos, não há garantias. O acidente pode acontecer de fato. Podemos manejar mal a intrincada máquina global que construímos e perder os benefícios do Antropoceno Bom. Isso é particularmente provável se diferentes condutores tentarem dirigir a máquina em direções diferentes ou se ignorarmos as luzes vermelhas de advertência que aparecem nos painéis de controle. Se a máquina quebrar e a produtividade despencar, não poderemos sustentar 7 bilhões de pessoas. Enfrentaremos um período sombrio de caos social, guerra, fome e doenças sem controle. Essa é a “lei do peixe” do *Arthashastra*. Se e

quando as coisas finalmente se estabilizarem, um número muito menor de sobreviventes viverá novamente dentro dos limites de energia da era agrária, na qual apenas uma pequena minoria pode desfrutar mais do que simples subsistência. Se causarmos sérios danos aos sistemas climáticos, até mesmo a agricultura pode não funcionar mais em grande parte do mundo. A agricultura dependia, afinal, dos climas estáveis do Holoceno.

Então, quem sabe? Como em algumas histórias de ficção científica, as populações humanas remanescentes talvez reconstruam lentamente algo parecido com o nosso mundo, guiadas, talvez, por lembranças, livros e manuscritos chamuscados ou pelos vestígios avariados de cidades, fábricas, máquinas e microchips. Ou será que existe, como alguns sugeriram, um limite para a complexidade que nós, humanos, podemos administrar? Chegamos a um nível de complexidade que está simplesmente além de nós? O destino de todas as espécies capazes de aprender coletivamente será talvez o de atingir um muro de complexidade, a partir do qual suas sociedades desmoronam? Será por isso que ainda não encontramos nenhuma outra espécie capaz de aprender coletivamente? Nos mitos gregos, os deuses castigam Sísifo, o rei de Corinto, por ser inteligente e ambicioso demais. Aconselhados, presumivelmente, pela entropia, eles o condenam a empurrar uma pedra montanha acima e vê-la rolar para baixo de novo, por toda a eternidade.

São hipóteses sombrias, mas não podemos ignorá-las. O universo é mesmo indiferente ao nosso destino. É um vasto oceano de energia para o qual pequenas ondas individuais como nós são efêmeras, fenômenos passageiros. A “dureza [de todos os grandes mitos]”, escreve Joseph Campbell,

é equilibrada pela garantia de que tudo aquilo que vemos não passa do reflexo de um poder que resiste inacessível à dor. Assim, os contos são, a um só tempo, sem piedade e sem terror, cheios do gozo de um anonimato transcendente, que se observa a si mesmo no interior de todos os egos voltados para si mesmos e dedicados aos conflitos, egos que nascem e morrem no plano temporal.<sup>2</sup>

A ciência moderna capta a aterrorizante indiferença do universo na primeira e na segunda lei da termodinâmica.

Mas nós, seres humanos, como todos os organismos vivos, temos objetivos e partimos em longas jornadas para alcançar esses objetivos, apesar da indiferença do universo. E histórias de todas as culturas descrevem essas jornadas perigosas, jornadas que nem sempre são bem-sucedidas, mas às vezes acontecem. Os viajantes suportam períodos em que tudo parece perdido, períodos de grande sofrimento. Há interrupções repentinas e inesperadas em sua busca. Ajudantes aparecem também, deuses ou amigos. E há pausas afortunadas. Assim, em todas as tradições mitológicas, as missões podem ser e são bem-sucedidas. Prontidão, determinação e esperança são as virtudes cruciais de qualquer um numa missão, porque o viajante que perde oportunidades, ou que desiste cedo demais, ou que se desespera, deve fracassar. Qualquer contador de histórias tradicional poderia ter-nos dito que essas são as qualidades de que precisaremos quando enfrentarmos um futuro imprevisível, cheio de perigos e oportunidades.

Nossa discussão do Antropoceno Bom e do Mau nos diz quais são os objetivos da busca humana neste exato momento. O primeiro é evitar um acidente. Se pudermos fazer isso, há dois objetivos adicionais: garantir que os benefícios do Antropoceno Bom estejam disponíveis para todos os seres humanos e garantir que a biosfera continue a prosperar, porque, se a biosfera fracassar, nenhuma missão poderá ser bem-sucedida. Nosso desafio é atingir esses objetivos, mesmo que eles

pareçam apontar em direções diferentes, às vezes em direção à indulgência, às vezes em direção à contenção.

Para que isso não soe grandiloquente, eis como a busca humana é descrita no preâmbulo do documento das Nações Unidas “Transformando o Nosso Mundo”, publicado em 2015:

Todos os países e todos os grupos interessados, atuando em parceria colaborativa, implementarão este plano. Estamos decididos a libertar a raça humana da tirania da pobreza e da privação e a sanar e proteger o nosso planeta. Estamos determinados a tomar medidas ousadas e transformadoras necessárias e urgentes para pôr o mundo em um caminho sustentável e resiliente. Ao embarcarmos nessa jornada coletiva, comprometemo-nos a não deixar ninguém para trás.

O documento continua:

*Pessoas.* Estamos determinados a acabar com a pobreza e a fome, em todas as suas formas e dimensões, e garantir que todos os seres humanos possam realizar o seu potencial em matéria de dignidade e igualdade, em um ambiente saudável.

*Planeta.* Estamos determinados a proteger o planeta da degradação, inclusive por meio do consumo e da produção sustentáveis, da gestão sustentável dos seus recursos naturais e de medidas urgentes para combater a mudança do clima, para que possa atender as necessidades das gerações presentes e futuras.

*Prosperidade.* Estamos determinados a assegurar que todos os seres humanos possam desfrutar de uma vida próspera e de plena realização pessoal, e que o progresso econômico, social e tecnológico ocorra em harmonia com a natureza.

Seguem-se dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável e 169 metas específicas a serem alcançadas, se tudo correr bem, nos próximos quinze anos.

É fácil ser cético. E cabe um pouco de cinismo. Não obstante, para alguém que cresceu em meados do século XX, quando havia pouca compreensão dos perigos do Antropoceno Mau, é notável ler declarações como essa de um órgão que representa a maioria das nações da Terra.

Logo após as metas de desenvolvimento sustentável serem publicadas, outro documento histórico apareceu: o Acordo de Paris sobre Mudança Climática. Ele foi adotado em 12 de dezembro de 2015, numa conferência da ONU com a presença de 195 nações. Entrou em vigor em 4 de novembro de 2016, quando um número suficiente de nações o ratificou formalmente. Seus objetivos são os seguintes:

- a) Assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a até 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos das alterações climáticas;
- b) Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos adversos das alterações climáticas e promover a resiliência do clima e o baixo desenvolvimento de emissões de gases do efeito estufa, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos;
- c) Tornar os fluxos financeiros consistentes com um caminho rumo a baixas emissões de gases de efeito estufa e ao desenvolvimento resiliente ao clima.

A tensão entre esses dois documentos capta muitas das dificuldades da busca por um mundo melhor, porque não está claro que as emissões de dióxido de carbono possam ser mantidas nos alvos declarados sem cortes drásticos no uso de combustíveis fósseis. Esses cortes são compatíveis com o crescimento sustentável? Talvez, se a produção de energia renovável aumentar com rapidez suficiente. Mas a tarefa certamente seria facilitada se houvesse um maior compromisso com a redistribuição e uma disposição para aceitar taxas mais lentas de crescimento econômico.

Nossa história moderna das origens sugere uma analogia útil, a das energias de ativação química. Essas energias fornecem o pontapé inicial que põe em movimento reações químicas vitais. Mas, depois que estão em andamento, elas necessitam de menos energia. Talvez possamos pensar nos combustíveis fósseis como a energia de ativação que foi

necessária para impulsionar o mundo de hoje. Agora que esse mundo novo está em movimento, será que podemos continuar com fluxos de energia menores e mais delicados, como os minúsculos fluxos, elétron por elétron, ou próton por próton, que são gerenciados por enzimas e que energizam as células vivas? Podemos imitar a respiração, o equivalente delicado e não disruptivo do fogo na grande vida?

A ideia de combustíveis fósseis como energia de ativação sugere uma outra coisa sobre o mundo de hoje. O dinamismo turbulento dos últimos séculos é típico de todos os períodos de destruição criativa. É o equivalente humano das energias gravitacionais que criam estrelas. Mas, depois que as violentas energias da criação fazem seu trabalho, esperamos um dinamismo novo e mais estável, pois algo novo assume seu lugar no universo. Como o nosso Sol, talvez possamos nos assentar num período de estabilidade dinâmica, tendo atravessado um novo limiar e construído uma nova sociedade mundial que preserva o melhor do Antropoceno Bom. A ideia de crescimento sem fim talvez esteja completamente errada. O dinamismo disruptivo dos séculos recentes talvez seja um fenômeno temporário. Afinal, levar a vida dentro de um quadro de estabilidade social e cultural tem sido a norma na maior parte da história humana e na maioria das sociedades humanas. E é por isso que uma compreensão do que significa viver rica e dinamicamente em um mundo menos mutável é preservada dentro das culturas de muitas comunidades indígenas modernas cujos indivíduos se consideram sobretudo guardiões de um mundo maior e mais antigo que eles.

Embora fora de moda atualmente, a ideia de um futuro sem crescimento contínuo pipocou periodicamente nas discussões de economistas com mentalidade filosófica. Muitos economistas do século XVIII, como Adam Smith, temiam um futuro sem crescimento, vendo-o

como o fim do progresso. Mas John Stuart Mill acolheu esse futuro como um revigorante contraste com o frenético mundo da corrida do ouro da Revolução Industrial. Em 1848, ele escreveu:

Confesso que não estou encantado com o ideal da vida sustentado por aqueles que pensam que o estado normal dos seres humanos é o de lutar para seguir em frente; que o atropelamento, o esmagamento, o acotovelamento e o pisotear dos pés uns dos outros, que compõem o tipo existente de vida social, sejam o destino mais desejável da espécie humana, ou algo além dos sintomas desagradáveis de uma das fases do progresso industrial.<sup>3</sup>

Em vez disso, propôs ele, “o melhor estado para a natureza humana é aquele em que ninguém é pobre, ninguém deseja ser mais rico, nem tem motivo algum para temer ser empurrado para trás pelos esforços de outros que querem avançar”. O crescimento ainda era necessário, afirmou ele, em muitos países mais pobres, mas os países mais ricos precisavam mais de uma melhor distribuição da riqueza. Com as necessidades básicas atendidas, a tarefa deles era viver mais plenamente, em vez de continuar adquirindo mais riqueza material.

Uma condição estacionária de capital e população não implica um estado estacionário de melhoria humana. Haveria o mesmo escopo de todos os tipos de cultura mental e progresso moral e social; o mesmo espaço para melhorar a Arte de Viver, e muito maior probabilidade de ela ser melhorada, quando as mentes deixassem de ser absorvidas pela arte de seguir em frente.

Ele advertiu que o estado estacionário deveria ser escolhido deliberadamente e em bons termos antes de ser imposto a uma humanidade relutante em termos muito mais pobres. “Eu sinceramente espero, em nome da posteridade, que eles se contentem em ficar parados, muito antes que a necessidade os obrigue a isso.”

Muitos outros reconheceram que o crescimento econômico não é o mesmo que uma vida boa. Em 1930, em um ensaio intitulado “Possibilidades econômicas para nossos netos”, o economista britânico John Maynard Keynes sustentou que dentro de um século a produtividade seria alta o suficiente para garantir a todos as necessidades da vida. Nesse momento, ele esperava que as pessoas parassem de trabalhar tanto e pensassem mais sobre como elas viviam. Em março de 1968, pouco antes de ser assassinado, Robert Kennedy descreveu as limitações de uma economia dedicada ao crescimento interminável do produto interno bruto:

O produto interno bruto contabiliza a poluição do ar e a publicidade de cigarros, e as ambulâncias para limpar a carnificina de nossas estradas. [...] Ele contabiliza a destruição das sequoias e a perda de nossas maravilhas naturais devido à expansão caótica. [...] No entanto, o PIB não leva em conta a saúde de nossos filhos, a qualidade da educação deles ou a alegria de suas brincadeiras. Ele não inclui a beleza de nossa poesia ou [...] a inteligência de nosso debate público, ou a integridade de nossos funcionários. [...] Ele mede tudo, em suma, exceto aquilo que faz a vida valer a pena.

Nossa crescente compreensão da biosfera nos diz por que precisamos tratá-la com mais cuidado. Quão resiliente é a biosfera, afinal? De verdade, não sabemos. Pode haver pontos de virada que acelerem mudanças danosas ao pôr em movimento ciclos perigosos de feedback positivo. Por exemplo, as geleiras, como as que cobrem a maior parte da Groenlândia, refletem a luz do Sol. Quando derretem, a Terra se torna mais escura e começa a absorver o calor em vez de refleti-lo. Isso aumenta a quantidade de calor retido na atmosfera e derrete mais geleiras, o que reduz a refletividade da Terra, o que, por sua vez, aumenta ainda mais o aquecimento. Tais mecanismos mostram por que precisamos pensar muito sobre os limites da biosfera.

O Centro de Resiliência de Estocolmo trabalhou por muitos anos na identificação de “fronteiras planetárias”: limites que a humanidade não pode cruzar sem comprometer seriamente nosso futuro.<sup>4</sup> O centro identificou nove limites cruciais dos quais dois, mudança climática e declínio da biodiversidade, são críticos porque, se um deles for seriamente violado, pode levar a biosfera para além dos limites estáveis.<sup>5</sup> É evidente que fazer um modelo das mudanças em escalas globais ainda é um negócio rudimentar. As sirenes não disparam quando cruzamos esses limites. Mas, com a devida cautela, os pesquisadores do centro concluem que já cruzamos a fronteira planetária da biodiversidade de modo bastante decisivo, e estamos nos aproximando das fronteiras da mudança climática. Cruzamos limites críticos em nossos impactos sobre os fluxos de fósforo e nitrogênio, e também estamos próximos dos limites em nosso uso da terra, particularmente das florestas. Estamos começando a ver luzes vermelhas de advertência nos painéis de controle da máquina global que construímos.

Se, apesar de todos os desafios, nós tivermos sucesso em nossa missão, como será um “Antropoceno maduro”?<sup>6</sup> Não será um mundo perfeito, é claro. Mas é importante que tentemos imaginar esse mundo enquanto tentamos construí-lo. Há tantos imponderáveis nisso que não podemos produzir nenhum tipo de croqui de arquiteto. Não obstante, podemos descrever algumas das principais características de um mundo que preserve o melhor do Antropoceno Bom e evite os perigos do Antropoceno Mau.

O crescimento da população diminuirá para zero e talvez comece a cair. As taxas de crescimento populacional já estão caindo na maior parte do mundo e, em algumas regiões, o número absoluto de pessoas está começando a diminuir. Há muitos passos que podem acelerar esse

processo, como melhor assistência à saúde para famílias pobres e melhor educação para mulheres e meninas em países mais pobres. Muitos economistas alertam sobre os perigos de desacelerar o crescimento populacional, mas uma perspectiva biosférica mostra por que o crescimento populacional contínuo é insustentável. Em um Antropoceno maduro, a pobreza será largamente eliminada por melhores sistemas de bem-estar social e controles do acúmulo de riqueza extrema. Como vimos, em termos relativos, a pobreza extrema já está em declínio em grande parte do mundo. Em algum momento, quando o crescimento econômico deixar de ser o objetivo principal dos governos, os indivíduos começarão a valorizar mais a qualidade de vida e o lazer do que o aumento da renda. Com o apoio dos governos, mais e mais pessoas abandonarão as formas extremas de competitividade. O atendimento às necessidades dessas pessoas impulsionará setores da economia que fornecem serviços em vez de bens materiais. A educação e a ciência se tornarão mais importantes para os governos, à medida que o conhecimento começar a substituir os bens materiais como fonte de riqueza e bem-estar. As ideias também mudarão — ideias a respeito do que faz uma vida boa e sobre os objetivos do bom governo.

As economias do mundo vão desmamar dos combustíveis fósseis em algum momento deste século. A produção de energia renovável já está crescendo com rapidez, de modo que não se trata de um objetivo irrealista, embora exija uma intervenção mais vigorosa dos governos do que acontece atualmente. Quando combinado com medidas para captar o dióxido de carbono atmosférico, um regime global de energia reformado pode limitar o aquecimento global a dois graus Celsius acima dos níveis pré-industriais. O aumento da eficiência no uso de energia e de materiais acabará reduzindo o consumo *total* de energia, e a

reciclagem de materiais existentes reduzirá o consumo de novos minerais e recursos naturais a quase zero.

Inovações e mudanças nos padrões de consumo farão parte de uma transformação maior da agricultura que a torne menos exigente em termos de recursos naturais e mais eficiente. A inovação científica certamente desempenhará um papel enorme nisso. Muitos recursos serão investidos na proteção da biodiversidade, de pântanos e de regiões frágeis, como recifes de corais ou ambientes de tundra.

Como disse Stuart Mill, um mundo mais estável não precisa ser um mundo estático. Com efeito, ele oferecerá ricas oportunidades para novas formas de arte, para uma vida social expandida e melhor, e para maneiras novas e menos manipuladoras de se envolver com o mundo natural. Nesse ponto, as sociedades modernas terão muito a aprender com aqueles que preservaram tradições do passado, de sociedades que viveram por milhares de anos num relacionamento mais estável com o meio ambiente. E não será razoável esperar que, num mundo assim, mesmo que o consumo médio de recursos naturais não aumente, a qualidade de vida possa melhorar para um grande número de pessoas?

Muitas das condições Cachinhos Dourados para cruzar esse novo limiar já estão surgindo, como a incrível riqueza intelectual do conhecimento científico moderno, a compreensão muito melhor de como a biosfera funciona e uma consciência crescente de que nós, humanos, compartilhamos um destino comum com nosso único lar, o planeta Terra. Também precisaremos de imagens vívidas de um futuro melhor para motivar a ação de hoje. A esperança é, afinal de contas, uma virtude crucial quando tentamos construir um mundo melhor, assim como a precaução (muita ciência boa ajudará) e a determinação (a política terá um papel fundamental nisso).

Enquanto escrevo este texto, em 2017, a determinação é a virtude que parece estar menos presente. É notável como hoje os governos de todo o mundo fazem de conta que concordam com algo semelhante à missão que descrevi. Mas ainda não existe um consenso global forte a respeito da missão. Muitos continuam convencidos de que as luzes de advertência que estão piscando são causadas por interruptores defeituosos e ciência ruim. E poucos se dão ao luxo de pensar nas grandes escalas necessárias para imaginar seriamente o futuro próximo. A maioria das pessoas, sobretudo os muito pobres, precisa concentrar-se nas necessidades e objetivos pessoais. E a maioria dos políticos e empresários tem de se concentrar em questões mais imediatas. Os governos são nacionais e competitivos, o que significa que a riqueza e o poder de cada nação separada tendem a ser maiores nos cálculos políticos do que as necessidades do mundo como um todo. A maioria dos governos também está presa a metas de curto prazo pelos métodos pelos quais as autoridades são escolhidas ou eleitas. Poucos podem definir metas firmes e realistas para vinte ou trinta anos no futuro, mas esses são os prazos que decidirão o resultado da busca por um mundo melhor. Por fim, em um mundo capitalista, a maioria das empresas é gerida pela necessidade de obter lucros e, hoje, a geração de lucros aponta, em geral, para direções diferentes da busca pela sustentabilidade.

Então, que chance existe de emergir um consenso global sobre a importância da missão? Um dos sinais mais promissores é a velocidade com que se alcançou um consenso científico, refletido em documentos como os objetivos de sustentabilidade da ONU e os acordos sobre o clima de Paris. Trinta anos atrás, essas declarações teriam sido inconcebíveis. Também podemos estar perto de um ponto de virada econômica em que a própria busca se mostre lucrativa e compatível com um capitalismo

global em evolução. Se isso acontecer, as colossais energias inovadoras e comerciais do capitalismo moderno e o poder dos governos que dependem da riqueza gerada pelo capitalismo podem apoiar a busca e dar a ela o tipo de impulso que os governos capitalistas deram à revolução industrial. Mas hoje, em um mundo mais complexo, o comportamento dos governos dependerá, em parte, da existência de eleitores que levem a sério a missão. Até certo ponto, isso dependerá de quão bem e quão persuasivamente as pessoas possam descrever a própria missão.

Se conseguirmos administrar com sucesso a transição para um mundo mais sustentável, uma espécie de limiar 9, ficará evidente que a história humana constitui de fato um limiar único de complexidade crescente, que culmina na gestão consciente de toda uma biosfera. Nós vemos a história humana em seções somente porque estamos muito próximos dela. O limiar maior e combinado começou com o aprendizado coletivo. Assim como a gravidade concentrou nuvens de matéria no início do universo, o aprendizado coletivo gerou sociedades humanas mais densas e complexas, acelerou a mudança e criou novas formas de dinamismo, dando aos seres humanos um controle crescente sobre a biosfera. A aceleração da mudança poderia ter continuado indefinidamente até levar a uma explosão catastrófica — talvez ao equivalente humano de uma supernova. Mas, se negociarmos com sucesso a transição para um mundo sustentável, parecerá, em retrospecto, que nós geramos uma nova e mais estável forma de complexidade, assim como a fusão gerou as estruturas novas e mais estáveis das estrelas, resistindo à contração gravitacional. Então, veremos que os limiares de 6 a 9 criaram um novo tipo de biosfera no planeta Terra, com novos termostatos e formas novas

e mais conscientes de regulação embutidas na noosfera, a esfera da mente. Como deveríamos chamar esse limiar? A Revolução Humana?

## ALÉM DOS SERES HUMANOS: FUTUROS MILENARES E COSMOLÓGICOS

Vamos ser otimistas e imaginar um mundo em que a missão tenha sido bem-sucedida. O limiar 9 foi ultrapassado com sucesso e a maioria dos seres humanos está florescendo dentro de uma sociedade global estável, baseada num relacionamento mais sustentável com a biosfera. Isso significa que as sociedades humanas poderão existir por vários milhares de anos, talvez até por centenas de milhares de anos.

Especular sobre o que virá a seguir nos leva ao aterrorizante, imprevisível, mas talvez utópico, mundo do futuro intermediário. Nessa escala, nossos modelos são realmente suposições. A chance de estarem certos é quase tão grande quanto as imagens do século XIX de aristocratas de ternos xadrez andando de bicicleta na Lua. O melhor que podemos fazer é percorrer uma lista de algumas possibilidades baseadas em tendências que já podemos ver.

Será que veremos o surgimento de estruturas governamentais globais que superem parcialmente os Estados-nação e finalmente eliminem a ameaça de guerra nuclear? A fusão proporcionará uma nova bonança energética? Em caso afirmativo, vamos usá-la com maior sensibilidade aos seus impactos disruptivos na biosfera, como uma ferramenta que pode estabelecer as bases para uma vida boa para todos os seres humanos? Ou encontraremos formas de controlar fluxos de energia ainda maiores para criar civilizações de complexidade inimaginável? O astrônomo russo Nikolai Kardachiov especulou que, se houver outras civilizações capazes de algo como o aprendizado coletivo, muitas terão aprendido a captar toda a energia utilizável de seus planetas, enquanto outras podem ter aprendido a administrar toda a energia de seu sistema

solar, e outras ainda podem até ter aprendido a utilizar a energia de galáxias inteiras.

Nossos descendentes migrarão para além da Terra? Começarão a minerar asteroides ou estabelecer colônias na Lua ou em Marte? Ou (se olharmos bem mais à frente) em planetas propícios à vida em sistemas estelares próximos? Criaremos novas formas de vida, novas culturas alimentares eficientes em termos de energia ou micróbios que possam tratar doenças ou deter o câncer? Projetaremos máquinas minúsculas, nanocirurgiões que possam entrar em nossos corpos e consertar órgãos quebrados, ou construir edifícios sem supervisão que obedecem aos projetos de arquitetos eletrônicos? Construiremos máquinas muito mais inteligentes do que nós? Se assim for, podemos ter certeza de que manteremos o controle delas?

Construiremos novos seres humanos? Micro e macromelhorias nos tornarão biônicos, nos darão vida mais longa e saudável e por fim nos transformarão em algo diferente, algo transumano? As novas tecnologias permitirão que os seres humanos troquem ideias, pensamentos, emoções e imagens instantânea e continuamente, criando algo como uma única e vasta mente global? A noosfera se separará parcialmente de nós, humanos, e se transformará numa camada fina e unificada de mente pairando sobre a biosfera? Quando, em meio a tudo isso, decidiremos que a história humana (tal como a entendemos hoje) terminou porque nossa espécie não pode mais ser descrita como *Homo sapiens*?

A nova ciência transformará nossa compreensão de nós mesmos e do universo, virando do avesso a história atual das origens? A comparação das histórias das origens de hoje com as de cem anos atrás sugere que isso poderia acontecer muito em breve e muitas vezes.

E existem também as incógnitas desconhecidas que podem mudar as trajetórias futuras em um ou dois segundos. Nossa ciência e nossa tecnologia já podem ser boas o suficiente para prever impactos de asteroides e talvez fazer alguma coisa a respeito disso. Mas pode haver outras catástrofes imprevisíveis, tais como... encontrar outras formas de vida. Se as encontrarmos, vamos espíá-las através de um microscópio (ou olhos bionicamente aprimorados)? Ou elas vão nos pegar com enormes pinças, nos colocar em vastas placas de Petri e *nos* espiar através de microscópios?

É um alívio voltar-se para escalas ainda maiores, onde podemos enfocar de novo coisas relativamente simples como planetas, estrelas, galáxias e o próprio universo.

Podemos rastrear os movimentos das placas tectônicas, para que possamos adivinhar mais ou menos onde os continentes estarão dentro de 100 milhões de anos. No momento, parece que as placas continentais voltarão a se reunir em um novo supercontinente que já foi apelidado de Amásia porque juntará a Ásia e a América. O destino final do planeta Terra será decidido pela evolução do Sol. Ele viverá por cerca de 9 bilhões de anos. Mas, se evoluir como outras estrelas semelhantes, em poucos bilhões de anos começará a se expandir e se transformar numa gigante vermelha. A Terra se verá dentro das camadas externas do Sol. À medida que a Terra esquentar, as coisas ficarão mais difíceis para a vida grande, e pode haver um longo período em que os únicos sobreviventes serão as arqueobactérias resistentes, como aquelas que sobrevivem nas fontes termais do parque Yellowstone. Por fim, até elas desaparecerão à medida que a Terra for esterilizada e depois engolida e evaporada dentro das camadas externas de uma estrela gigante vermelha cada vez mais instável e imprevisível. Esse é o fim do planeta Terra e de quaisquer descendentes

nossos que ainda estiverem vivos, a menos que tenham viajado para os confins do sistema solar ou para outros sistemas estelares. Quanto ao Sol, depois de um longo período como gigante vermelha, acabará por soprar para longe suas camadas externas, se transformará numa anã branca, migrará para o fundo do diagrama de Hertzsprung-Russell e então ficará por ali, esfriando, por centenas de bilhões de anos.

Mais ou menos na época em que nosso Sol se desgarrar, nossa galáxia colidirá com a galáxia vizinha de Andrômeda. Será um caso tranquilo, como uma colisão entre duas nuvens. Mas dentro de cada galáxia haverá muita turbulência, pois as estrelas puxarão umas às outras de formas imprevisíveis. E a nova galáxia, combinando a Via Láctea e Andrômeda, será muito mais confusa do que as duas belas galáxias em espiral que lhe darão origem.

O que dizer do universo como um todo? Hoje, a maioria dos cosmólogos está bastante confiante em que há uma história para ser contada, porque o futuro do universo parece depender de um pequeno número de variáveis. As fundamentais são o ritmo de expansão e a quantidade de matéria/energia no universo. Já se pensou que a força gravitacional da matéria no universo acabaria por refrear a expansão, colocá-la em marcha a ré e encolher o universo novamente em outro átomo primordial, que por sua vez poderia explodir e se expandir para criar um novo universo, e a sequência poderia se repetir numa série infinita de rebotes cosmológicos. Mas, desde que se descobriu, no final da década de 1990, que o ritmo da expansão está aumentando, parece que deve existir algum tipo de energia escura que seja poderosa o suficiente para anular a atração gravitacional de toda a massa e energia do universo. Isso sugere que o universo continuará se expandindo para sempre e o fará com rapidez cada vez maior.

Quando falamos sobre o futuro remoto do universo, começamos a perceber que a história que contamos até agora era apenas o prefácio. A marcha de todas as coisas tem uma longa e às vezes difícil jornada pela frente. Nós, humanos, vivemos bem no começo da história do universo, e sua narração está apenas começando. Nosso universo ainda é jovem e cheio de energia; tem muito a ser feito e muitas novas estruturas complexas para construir.

Mas num futuro muito distante, zilhões de anos depois de termos desaparecido, a história se torna mais sombria, literal e metaforicamente. O universo se expandirá cada vez mais rápido, galáxias distantes desaparecerão como navios no horizonte do espaço-tempo e, por fim, qualquer pessoa ou qualquer coisa que restarem em nossa galáxia se sentirão seriamente sozinhas.<sup>7</sup> As estrelas continuarão se formando e queimando até  $10^{15}$  anos no futuro, quando o universo for 10 mil vezes mais velho do que é hoje. A essa altura, ele estará mostrando sua verdadeira idade, porque as últimas estrelas terão parado de queimar e as luzes terão se apagado. Nossa galáxia se transformará num cemitério cheio de cinzas resfriadas de estrelas e planetas.

Mas ainda haverá coisas se movendo no cemitério. Buracos negros vão sugar os restos das estrelas e planetas. Quando terminarem de fazer isso, eles se voltarão uns contra os outros em guerras civis canibais até que restem apenas alguns enormes buracos negros inchados. Eles ficarão lá por períodos inimagináveis, talvez por  $10^{100}$  anos, e suarão energia até que finalmente eles também diminuam, desapareçam e evaporem. Chegaremos à conclusão de que tudo o que parecia permanente em nosso universo era, na verdade, efêmero. Talvez até o espaço e o tempo se revelem meras formas, meras ondulações num multiverso maior. A entropia terá finalmente destruído toda a estrutura e ordem.

Pelo menos em um universo. Mas talvez existam outros para continuarmos trabalhando.

## Agradecimentos

Não tenho como agradecer a todas as pessoas que me ajudaram neste livro ao instruir-me, ler rascunhos de manuscritos, indicar-me livros importantes e autores importantes, comentar minhas palestras e dar palestras a que assisti. Nós, seres humanos, nadamos num mar de ideias, e um livro como este é construído ao se apanhar ideias que passam flutuando, ligá-las a outras ideias, dobrá-las, talvez entortá-las, talvez encontrar novas conexões. Posso remontar algumas ideias a determinados indivíduos e até mesmo a determinadas conversas particulares, mas muitas delas se alojaram em meu cérebro e fermentaram, às vezes por vários anos, antes de aparecer em outra parte do meu cérebro em novas formas e sem rótulos para me lembrar de suas fontes. Por isso, não sei a quem agradecer por muitas das ideias deste livro. Tudo o que posso fazer é oferecer um agradecimento geral a meus numerosos colegas e amigos e ao rico processo de aprendizado coletivo que abasteceu minha mente com inúmeras ideias do mundo maravilhoso e prolífico de hoje. A grande história é um projeto coletivo, uma propriedade emergente de sinergias entre muitas, muitas mentes.

A *algumas* pessoas posso agradecer diretamente. Um pequeno grupo de acadêmicos afins se reuniu em torno da ideia da grande história e seus análogos e trabalhou para promover a educação e a pesquisa em grande

história. Entre elas estão pioneiros como o astrofísico Eric Chaisson, o sociólogo Johan Goudsblom e todos aqueles que ajudaram a formar e promover a Associação Internacional de Grande História (listados em ordem alfabética): Walter Alvarez, Mojgan Behmand (e seus muitos colegas da Universidade Dominicana), Craig e Pamela Benjamin, Cynthia Brown, Leonid Grinin, Lowell Gustafson, Andrey Korotayev, Lucy Laffitte, Jonathan Markley, John Mears (que começou a lecionar grande história ao mesmo tempo que eu), Alessandro Montanari, Esther Quaedackers, Barry Rodrigue, Fred Spier, Joe Voros, Sun Yue e muitos outros que ajudaram a construir a história da grande história. Trabalhei particularmente junto de Craig Benjamin e Cynthia Brown no primeiro livro didático de uma grande história, numa colaboração extraordinariamente amigável e frutífera. Infelizmente, minha amizade com Cynthia terminou em razão de seu falecimento, em 15 de outubro de 2017; uma das pioneiras da grande história, sua falta será sentida por todos os que trabalham nesse campo. Muitos historiadores mundiais apoiaram a ideia da grande história ao longo dos anos, como Felipe Fernández-Armesto, Bob Bain, Terry Burke, Ross Dunn, Pat Manning, Merry Wiesner-Hanks e outros. Dois grandes historiadores mundiais emprestaram seu imenso prestígio ao novo campo: William H. McNeill, que viu a grande história como a próxima fase lógica depois da história mundial, e Jerry Bentley, o primeiro que me convidou para publicar sobre a relação entre a grande história e a história mundial. A Teaching Company me convidou para dar uma série de palestras sobre a grande história, e Bill Gates, que ouviu essas palestras, deu um tremendo impulso ao campo ao apoiar a criação de um programa on-line gratuito para escolas de ensino médio e me convidar para dar uma TED Talk sobre grande história em 2011. Seu apoio resultou no Big History Project,

muito bem gerido primeiramente por Michael Dix e seus colegas da Intentional Futures e agora por uma equipe liderada por Andy Cook e Bob Regan. Entre os cocriadores do Big History Project estão centenas de professores, escolas e estudantes que fizeram a corajosa aposta de ensinar e aprender essa nova e ambiciosa abordagem do passado. O Fórum Econômico Mundial permitiu que eu falasse sobre a grande história como um projeto global e, nas reuniões anuais em Davos, tive o privilégio de ser apresentado por dois ganhadores do prêmio Nobel: o ex-vice-presidente dos Estados Unidos Al Gore e o astrofísico australiano Brian Schmidt. Tive também o privilégio de visitar o lago Mungo e conhecer Mary Pappin, uma anciã Mutthi Mutthi cuja família desempenhou um papel crucial no retorno à terra natal dos restos mortais da mulher e do homem de Mungo.

Passei a maior parte da minha carreira na Universidade Macquarie, em Sydney, e essa instituição apoiou a ideia da grande história desde que comecei a lecionar nela, com colegas de toda a universidade, em 1989. Meus agradecimentos especiais a Bruce Dowton e seus colegas por apoiarem a grande história e a criação do Instituto da Grande História da Universidade Macquarie, muito habilmente liderado por Andrew McKenna, Tracy Sullivan e David Baker (que é, até onde sei, o primeiro a obter um ph.D. em grande História). Ao longo dos anos, meus colegas do Departamento de História Moderna deram imenso apoio a esse novo modo de pensar a história, e muitos lecionaram grande história ao meu lado. Meus agradecimentos a todos eles e, em especial, a Marnie Hughes-Warrington, Peter Edwell e Shawn Ross. Meus agradecimentos também aos meus muitos alunos de grande história, que me mantiveram na linha reta e estreita, sempre me trazendo de volta às questões mais simples e profundas. Passei oito anos muito agradáveis na Universidade Estadual

de San Diego, cujos historiadores proporcionaram apoio e insights inteligentes sobre o modo como essa nova abordagem da história poderia atuar nas diversas comunidades acadêmicas dos Estados Unidos e cujos alunos de pós-graduação se mostraram extraordinariamente disciplinados e instrutores qualificados em grande história.

Muitos especialistas de diferentes áreas ofereceram novos insights ou correções de rumo, entre eles Lawrence Krauss, Charles Lineweaver, Stuart Kauffman, Ann McGrath, Iain McCalman, Will Steffen, Jan Zalasiewicz e muitos, muitos mais. Recebi imenso apoio e fecundo feedback de meus editores da Little, Brown e da Penguin: Tracy Behar, Charlie Conrad e Laura Stickney. Agradeço a Tracy Roe por seu copidesque escrupuloso e aguçado. E devo uma enorme gratidão a John Brockman, que apoiou a ideia deste livro desde o momento em que o sugeri pela primeira vez.

Vários amigos gentilmente leram e comentaram os rascunhos deste manuscrito. Entre eles estão Craig Benjamin, Cynthia Brown, Nick Doumanis, Connie Elwood, Lucy Laffitte, Ann McGrath, Bob Regan, Tracy Sullivan e Ian Wilkinson.

Para minha família, a grande história tornou-se uma espécie de indústria caseira. Chardi, Emily e Joshua analisaram os rascunhos deste manuscrito, e seus comentários e ideias ao longo dos anos muitas vezes me enviaram em novas direções. Para Chardi, devo a profunda percepção de que a grande história é realmente uma história moderna das origens. Para eles e para minha família mais ampla (inclusive minha mãe, que foi minha primeira professora), devo a profunda gratidão de alguém cuja vida foi abençoada pela bondade e amor daqueles que lhe estão mais próximos. Dedico este livro à minha família, aos meus netos

Daniel Richard e Evie Rose Molly, e a todos os estudantes em todos os lugares que aceitam o desafio enorme de construir um mundo melhor.

# Notas

Tentei ser o mais breve possível nas notas, exceto em temas sobre os quais exista controvérsia significativa.

## PREFÁCIO

1. William H. McNeill, “Mythistory, or Truth, Myth, History, and Historians”, *American Historical Review* 91, n. 1, fevereiro de 1986, p. 7.

2. H. G. Wells, *Outline of History: Being a Plain History of Life and Mankind*, 3. ed. Nova York: Macmillan, 1921, p. vi.

3. O grande biólogo E. O. Wilson foi eloquente ao escrever sobre a importância vital de estabelecer vínculos mais próximos entre as modernas disciplinas acadêmicas; ver E. O. Wilson, *Consilience: The Unity of Knowledge*. Londres: Abacus, 1998.

4. Usei esse termo pela primeira vez em “The Case for ‘Big History’”, *Journal of World History* 2, n. 2, outono de 1991, pp. 223-38.

## INTRODUÇÃO

1. Sobre a história dessas descobertas e as percepções muito diferentes que delas tiveram os arqueólogos e aqueles que vivem hoje perto do lago Mungo, ver o maravilhoso documentário curto de Andrew Pike e Ann McGrath, *Message from Mungo* (Ronin Films, 2014).

2. Sobre a arqueologia do interior da Austrália, ver o excelente livro de Mike Smith *The Archaeology of Australia's Deserts*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

3. *The Power of Myth*, episódio 2, Bill Moyers e Joseph Campbell, 1988, <<https://billmoyers.com/content/ep-2-joseph-campbell-and-the-power-of-myth-the-message-of-the-myth/>>.

4. Walter Alvarez, *A Most Improbable Journey: A Big History of Our Planet and Ourselves*. Nova York: W. W. Norton, 2016, p. 33.

5. Em Fritjof Capra e Pier Luigi Luisi, *The Systems View of Life: A Unifying Vision*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, p. 280. [Ed. bras. *A visão sistêmica da vida: Uma concepção unificada e suas implicações filosóficas, políticas, sociais e econômicas*. Trad. Mayra Terya Eichenberg e Newton Roberval Eichenberg. São Paulo: Cultrix, 2014.]

6. O princípio dos Cachinhos Dourados foi examinado em detalhes em Fred Spier, *Big History and the Future of Humanity*, 2. ed. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2015, pp. 63-8 ss.

## 1. NO PRINCÍPIO: LIMIAR 1

1. Richard S. Westfall, *The Life of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993, p. 259. Mais tarde, Newton mudou de posição a respeito da ideia do universo como “sensorium” de Deus, mas preservou a noção de que Deus era “onipresente no sentido literal”.
2. Bertrand Russell, “Why I Am Not a Christian”, conferência proferida no Battersea Town Hall, Londres, em março de 1927.
3. Citado em David Christian. *Maps of Time: An Introduction to Big History*, 2. ed. Berkeley: University of California Press, 2011, p. 17.
4. Deborah Bird Rose, *Nourishing Terrains: Australian Aboriginal Views of Landscape and Wilderness*. Canberra: Australian Heritage Commission, 1996, p. 23.
5. Joseph Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, 2. ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1968, p. 261. [Ed. bras. *O herói de mil faces*. Trad. Adail Ubirajara Sobral. São Paulo: Pensamento, 1989.]
6. Stephen Hawking, *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. Londres: Bantam, 1988, p. 151. [Ed. bras. *Uma breve história do tempo*. Trad. Cássio de Arantes Leite. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.]
7. Agradeço a Elise Bohan por essa citação de Terry Pratchett, *Lords and Ladies*. Londres: Victor Gollancz, 1992.
8. Sobre paradigmas, o texto clássico é Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 2. ed. Chicago: University of Chicago Press, 1970. [Ed. bras. *A estrutura das revoluções científicas*, 13. ed. São Paulo: Perspectiva, 2018.]
9. Peter Atkins, *Chemistry: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2015, loc. 722, Kindle.
10. Lawrence Krauss, *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing*. Nova York: Simon and Schuster, 2012. [Ed. bras. *Um universo que veio do nada*. Trad. Alessandra Cavalli Esteche. São Paulo: Paz e Terra, 2013.]
11. Erwin Schrödinger, *What Is Life? & Mind and Matter*. Cambridge: Cambridge University Press, 1967, p. 73.
12. Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, pp. 25-6.
13. Peter M. Hoffmann, *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*. Nova York: Basic Books, 2012, loc. 179, Kindle.
14. Para mais detalhes sobre essa ideia, ver Krauss, op. cit.

## 2. ESTRELAS E GALÁXIAS: LIMIARES 2 E 3

1. “De um ponto de vista molecular, o aumento de um peso corresponde ao movimento de todos os seus átomos na mesma direção. [...] O trabalho é a transferência de energia que faz uso do movimento uniforme de átomos nos arredores.” Peter Atkins, *Four Laws That Drive the Universe*. Oxford: Oxford University Press, 2007, p. 32.

2. Ver Eric Chaisson, *Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001, e Fred Spier, *Big History and the Future of Humanity*, 2. ed. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2015.

3. Andrew King, *Stars: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2012, p. 49.

4. Ibid., p. 59.

5. Ibid., p. 66.

6. Ibid.

### 3. MOLÉCULAS E LUAS: LIMIAR 4

1. Peter Atkins, *Chemistry: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2015, loc. 788, Kindle.
2. Robert M. Hazen, “Evolution of Minerals”, *Scientific American*, março de 2010, p. 61.
3. John Chambers e Jacqueline Mitton, *From Dust to Life: The Origin and Evolution of Our Solar System*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2014, p. 7.
4. Doug Macdougall, *Why Geology Matters: Decoding the Past, Anticipating the Future*. Berkeley: University of California Press, 2011, p. 4.
5. Idem, *Nature's Clocks: How Scientists Measure the Age of Almost Everything*. Berkeley: University of California Press, 2008, pp. 58-60.
6. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2016, loc. 1297, Kindle.

#### 4. VIDA: LIMIAR 5

1. Tanto as metáforas quanto os cálculos são de Peter Hoffmann, *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*. Nova York: Basic Books, 2012, loc. 238, Kindle.

2. John Holland, *Complexity: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2014, p. 8. Os sistemas adaptativos complexos contêm “elementos que não são fixos. Os elementos, usualmente chamados *agentes*, aprendem ou se adaptam em resposta a interações com outros agentes”.

3. Seth Lloyd, *Programming the Universe*. Nova York: Knopf, 2006, p. 44.

4. Gregory Bateson, citado em Luciano Floridi, *Information: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2010, loc. 295, Kindle.

5. Daniel C. Dennett, *Kinds of Minds: Towards an Understanding of Consciousness*. Londres: Weidenfeld and Nicolson, 1996, p. 82.

6. David S. Goodsell, *The Machinery of Life*, 2. ed. Nova York: Springer Verlag, 2009, loc. 700, Kindle.

7. “Qualquer processo que gere estrutura aumenta a informação latente inerente àquela estrutura, o que corresponde a uma diminuição da entropia (número reduzido de microestados).” De Anne-Marie Grisogono, “(How) Did Information Emerge?”, em *From Matter to Life: Information and Causality*. Sara Imari Walker, Paul C. W. Davies e George F. R. Ellis (Orgs.). Cambridge: Cambridge University Press, 2017, capítulo 4, Kindle.

8. Hoffmann, op. cit., loc. 3058, Kindle.

9. Charles Darwin, *The Origin of Species*. Nova York: Penguin, 1985, pp. 130-1. [Ed. bras. *A origem das espécies*. Trad. Pedro Paulo Pimenta. São Paulo: Ubu, 2018.]

10. A potência da ideia de Darwin e sua capacidade de chocar estão narradas de forma soberba em Daniel Dennett, *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life*. Londres: Allen Lane, 1995.

11. Uma boa discussão sobre as condições Cachinhos Dourados para a química rica encontra-se em Jeffrey Bennett e Seth Shostak, *Life in the Universe*, 3. ed. Boston: Addison-Wesley, 2011, capítulo 7.

12. Daniel C. Dennett, *From Bacteria to Bach: The Evolution of Minds*. Nova York: Penguin, 2017, p. 48.

13. *Science* 356, n. 6334, 14 de abril de 2017, p. 132.

14. Robert M. Hazen, “Evolution of Minerals”, *Scientific American*, março de 2010, p. 58.

15. Peter Ward e Joe Kirschvink, *A New History of Life: The Radical New Discoveries About the Origins and Evolution of Life on Earth*. Londres: Bloomsbury Press, 2016, pp. 65-6.

16. Allen P. Nutman et al., “Rapid Emergence of Life Shown by Discovery of 3,700-Million-Year-Old Microbial Structures”, *Nature* 537, 22 de setembro de 2016, pp. 535-8,

doi:10.1038/nature19355.

17. Nadia Drake, “This May Be the Oldest Known Sign of Life on Earth”, *National Geographic*, 1o de março de 2017, <<https://news.nationalgeographic.com/2017/03/oldest-life-earth-iron-fossils-canada-vents-science/>>.

18. Madeline C. Weiss et al., “The Physiology and Habitat of the Last Universal Common Ancestor”, *Nature Microbiology* 1, artigo n. 16116, 2016, doi:10.1038/nmicrobiol.2016.116.

19. Nick Lane, *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution*. Nova York: W. W. Norton, 2009, loc. 421, Kindle.

20. Terrence Deacon chama isso de autocélula; ver Grisogono, op. cit.

## 5. A VIDA PEQUENA E A BIOSFERA

1. Sobre a ideia de biosfera, ver Vaclav Smil, *The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics, and Change* (Cambridge, MA: MIT Press, 2002), e a obra pioneira de Vladímir Vernadski *The Biosphere* (Göttingen: Copernicus, 1998), com prefácio de Lynn Margulis. Para um curto resumo da história da biosfera, ver Mark Williams et al., “The Anthropocene Biosphere”, *Anthropocene Review*, 2015, pp. 1-24, doi: 10.1177/2053019615591020.

2. David Christian, Cynthia Stokes Browne e Craig Benjamin. *Big History: Between Nothing and Everything*. Nova York: McGraw-Hill, 2014, p. 46.

3. Andrea Wulf, *The Invention of Nature: The Adventures of Alexander von Humboldt, the Lost Hero of Science*. Londres: John Murray, 2015, loc. 2368, Kindle. [Ed. bras. *A invenção da natureza: A vida e as descobertas de Alexander von Humboldt*. Trad. Renato Marques. São Paulo: Planeta, 2016.]

4. Jeffrey Bennett e Seth Shostak, *Life in the Universe*, 3. ed. Boston: Addison-Wesley, 2011, p. 130.

5. Robert M. Hazen, “Evolution of Minerals”, *Scientific American*, março de 2010, p. 63.

6. Bennett e Shostak, op. cit., p. 134.

7. David Grinspoon, *Earth in Human Hands: Shaping Our Planet's Future*. Nova York: Grand Central Publishing, 2016, p. 204.

8. Ver a discussão desses mecanismos em *ibid.*, pp. 44 ss.

9. Peter Ward e Joe Kirschvink, *A New History of Life: The Radical New Discoveries About the Origins and Evolution of Life on Earth*. Londres: Bloomsbury Press, 2016, p. 64.

10. Dennis Bray, *Wetware: A Computer in Every Living Cell*. New Haven, CT: Yale University Press, 2009, loc. 1084, Kindle.

11. Descrição de Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*. Nova York: Springer, 2013, p. 70.

12. Ver Andrew Knoll, *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003, p. 20; o livro é excelente sobre a espantosa diversidade de sistemas metabólicos procarióticos. Sobre os fluxos de energia captados pelos primeiros organismos, ver Olivia P. Judson, “The Energy Expansions of Evolution”, *Nature: Ecology and Evolution* 28, abril de 2017, pp. 1-9.

13. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2016, p. 18.

14. *Ibid.*, loc. 1344, Kindle.

15. Robert M. Hazen, “Evolution of Minerals”, *Scientific American*, março de 2010, p. 63.

16. Lenton, op. cit., loc. 1418, Kindle.

17. Donald E. Canfield, *Oxygen: A Four Billion Year History*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2014, loc. 893, Kindle.
18. Lenton, op. cit., loc. 1438, Kindle.
19. Roth, op. cit., pp. 73-5.

## 6. A VIDA GRANDE E A BIOSFERA

1. Michael J. Benton, *The History of Life: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2008, loc. 766, Kindle, e ver Dennis Bray, *Wetware: A Computer in Every Living Cell*. New Haven, CT: Yale University Press, 2009, loc. 2008 ss., Kindle.

2. Siddhartha Mukherjee, *The Gene: An Intimate History*. Nova York: Scribner, 2016, loc. 5797, Kindle. [Ed. bras. *O gene: Uma história íntima*. Trad. Laura Teixeira Motta. São Paulo: Companhia das Letras, 2016.]

3. Sean B. Carroll, *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*. Londres: Weidenfeld and Nicolson, 2011, pp. 71 ss.

4. Grande parte da discussão seguinte baseia-se em Peter Ward e Joe Kirschvink, *A New History of Life: The Radical New Discoveries About the Origins and Evolution of Life on Earth*. Londres: Bloomsbury Press, 2016, capítulo 7.

5. Doug Macdougall, *Why Geology Matters: Decoding the Past, Anticipating the Future*. Berkeley: University of California Press, 2011, p. 132.

6. Ward e Kirschvink, op. cit., p. 119.

7. Ibid., p. 124.

8. Niles Eldredge e S. J. Gould, “Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism”, em *Models in Paleobiology*, T. J. M. Schopf (Org.). San Francisco: Freeman Cooper, 1972, pp. 82-115.

9. Um livro maravilhoso embora controverso sobre os fósseis do xisto de Burgess é Stephen Jay Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. Londres: Hutchinson, 1989.

10. A expressão é usada por Ward e Kirschvink, op. cit., p. 222.

11. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2016, p. 44.

12. Ibid., p. 48: “A mudança mais pronunciada no CO<sub>2</sub> atmosférico durante o éon fanerozoico deveu-se às plantas que colonizaram a terra. Esse processo começou por volta de 470 milhões de anos atrás e se intensificou com as primeiras florestas, há 370 milhões de anos. Estima-se que a aceleração resultante da erosão do silicato tenha baixado a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico por uma ordem de magnitude e resfriado o planeta, causando uma série de eras glaciais nos períodos carbonífero e permiano”.

13. Ibid., p. 72.

14. Ibid., p. 24, sobre a relação entre enterramento do carbono e níveis de oxigênio atmosférico. Robert M. Hazen, em “Evolution of Minerals” (*Scientific American*, março de 2010, p. 58), sustenta que por volta de 400 milhões de anos atrás a Terra já tinha todo o seu complemento de mais de 4 mil tipos de minerais.

15. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*. Nova York: Springer, 2013, p. 229.

16. Daniel Cossins, “Why Do We Seek Knowledge?”, *New Scientist*. 1o de abril de 2017, p. 33.
17. O neurocientista António Damásio, em *Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Mind* (Calgary, Alberta: Cornerstone Digital, 2011), afirma que nosso senso de consciência está embutido nesses mapas da realidade em constante mudança que começam com mapas sensoriais, visuais e sensíveis de nossos próprios corpos.
18. Dylan Evans, *Emotion: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2001, loc. 334, Kindle.
19. Roth, op. cit., pp. 15-6.
20. Ibid., pp. 162-3.
21. Nessa discussão, seguirei de perto a descrição desse evento feita por Walter Alvarez, o geólogo que demonstrou que o impacto de um asteroide varreu os dinossauros da superfície da Terra; ver seu maravilhoso livrinho *T. Rex and the Crater of Doom*. Nova York: Vintage, 1998.
22. *Science News*, <<https://www.sciencenews.org/article/devastation-detectives-try-solve-dinosaur-disappearance>>.
23. Stephen Brusatte e Zhe-Xi Luo, “Ascent of the Mammals”, *Scientific American*, junho de 2016, pp. 20-7.
24. Ward e Kirschvink, op. cit., p. 315.
25. Ibid., p. 316.

## 7. SERES HUMANOS: LIMIAR 6

1. Essa posição é defendida com eloquência por David Grinspoon em *Earth in Human Hands: Shaping Our Planet's Future*. Nova York: Grand Central Publishing, 2016.

2. Robin Dunbar, *The Human Story: A New History of Mankind's Evolution*. Londres: Faber and Faber, 2004, p. 71.

3. Gerhard Roth, *The Long Evolution of Brains and Minds*. Nova York: Springer, 2013, p. 226.

4. Trata-se de uma velha piada que encontrei em Daniel Dennett, *Consciousness Explained* (Londres: Penguin, 1991, p. 177); Dennett atribui a comparação com a carreira universitária ao neurocientista colombiano-americano Rodolfo Llinás.

5. Sobre esta última ideia, ver Michael S. A. Graziano, *Consciousness and the Social Brain*. Oxford: Oxford University Press, 2013.

6. As complexidades da política de macacos e símios são examinadas em obras de Frans de Waal e Jane Goodall e, mais recentemente, num estudo de comunidades de babuínos de Dorothy L. Cheney e Robert M. Seyfarth, *Baboon Metaphysics: The Evolution of a Social Mind*. Chicago: University of Chicago Press, 2007.

7. Ver Christopher Seddon, *Humans: From the Beginning*. Nova York: Glanville Books, 2014, pp. 42-5.

8. Sobre EQ, ver *ibid.*, pp. 225 ss., e Roth, *op. cit.*, p. 232.

9. Roth, *op. cit.*, p. 228.

10. Ver John Gowlett, Clive Gamble e Robin Dunbar, “Human Evolution and the Archaeology of the Social Brain”, *Current Anthropology* 53, n. 6, dezembro de 2012, pp. 695-6, sobre a correlação entre tamanho do cérebro e tamanho do grupo.

11. *New Scientist*, 29 de abril de 2017, p. 10.

12. Robin Dunbar, *Human Evolution*. Nova York: Penguin, 2014, p. 163.

13. Gowlett, Gamble e Dunbar, *op. cit.*, pp. 695-6.

14. Michael Tomasello, *The Cultural Origins of Human Cognition*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1999, loc. 39, Kindle.

15. James R. Hurford, *The Origins of Language: A Slim Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2014, p. 68; Cheney e Seyfarth, *Baboon Metaphysics*, loc. 2408, Kindle: “Os indícios de ensino por primatas não humanos [...] podem ser resumidos numa palavra: escassos”.

16. Tomasello, *The Cultural Origins of Human Cognition*, loc. 5, Kindle: “A transmissão social fiel [...] pode funcionar como uma chave catraca para evitar uma volta para trás — de modo que o artefato ou prática recém-inventado preserve sua forma nova e aperfeiçoada com pelo menos certa fidelidade até que aconteça uma nova modificação ou melhoria”. Tomasello chama esse processo de *aprendizado colaborativo*.

17. Steven Pinker, *The Sense of Style: The Thinking Person's Guide to Writing in the Twenty-First Century*. Nova York: Penguin, 2015, p. 110.
18. Essa ideia é sugerida por Roth, op. cit., p. 264; sobre a capacidade humana singular de lembrar muitas palavras, ver Hurford, *The Origins of Language*, p. 119.
19. Ver Terrence Deacon, *The Symbolic Species: The Co-Evolution of Language and the Brain* (Nova York: W. W. Norton, 1998), e Michael Tomasello, *Why We Cooperate* (Cambridge, MA: MIT Press, 2009). Para pesquisas recentes sobre a evolução da linguagem, ver W. Tecumseh Fitch, *The Evolution of Language* (Cambridge: Cambridge University Press, 2010), e Peter J. Richerson e Robert Boyd, "Why Possibly Language Evolved" (*Biolinguistics* 4, n. 2/3, 2010, pp. 289-306). Alex Mesoudi, *Cultural Evolution: How Darwinian Theory Can Explain Human Culture and Synthesize the Social Sciences* (Chicago: University of Chicago Press, 2011), é um belo exame recente do farto corpo de pesquisas sobre mudança cultural de uma perspectiva darwiniana.
20. Eric R. Kandel, *In Search of Memory: The Emergence of a New Science of Mind*. Nova York: W. W. Norton, 2006, loc. 330, Kindle.
21. William H. McNeill, "The Rise of the West After Twenty-Five Years", *Journal of World History*, v. 1, n. 1, 1990, p. 2.
22. Sally McBrearty e Alison S. Brooks, "The Revolution That Wasn't: A New Interpretation of the Origin of Modern Human Behavior", *Journal of Human Evolution* n. 39, 2000, pp. 453-563.
23. A imagem é de Peter J. Richerson e Robert Boyd, *Not by Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution*. Chicago: University of Chicago Press, 2005, p. 139.
24. Dunbar, op. cit., p. 13.
25. Há uma boa visão geral sintética em Chris Scarre (Org.), *The Human Past: World Prehistory and the Development of Human Societies*. Londres: Thames and Hudson, 2005, pp. 143-5.
26. Peter Hiscock, "Colonization and Occupation of Australasia", em *Cambridge World History*, vol. 1, Merry Wiesner-Hanks (Org.). Cambridge: Cambridge University Press, 2015, p. 452.
27. Essas migrações estão bem descritas em Peter Bellwood, *First Migrants: Ancient Migration in Global Perspective*. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2013.
28. Sobre o modelo de dispersão inicial, ver Hiscock, op. cit., pp. 433-8.
29. Números de David Christian, *Maps of Time: An Introduction to Big History*. 2. ed. Berkeley: University of California Press, 2011, p. 143.
30. Marshall Sahlins, "The Original Affluent Society", *Stone Age Economics*. Londres: Tavistock, 1972, pp. 1-39.

## 8. AGRICULTURA: LIMIAR 7

1. Vaclav Smil, *Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature* Cambridge, MA: MIT Press, 2013.
2. Jared Diamond, em *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies* (Londres: Vintage, 1998), desenvolve a ideia de um experimento natural em seu último capítulo.
3. Ver <<http://www.theaustralian.com.au/national-affairs/indigenous/aborigines-were-building-stone-houses-9000-years-ago/news-story/30ef4873a7c8aaa2b80d01a12680df77>>.
4. Uma bela visão geral recente da mudança dos papéis de gênero na história humana é Merry E. Wiesner-Hanks, *Gender in History: Global Perspectives*, 2. ed. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2011.
5. Marc Cohen, *The Food Crisis in Prehistory*. New Haven, CT: Yale University Press, 1977, p. 65: “Grupos em todo o mundo seriam forçados a adotar a agricultura uns dos outros dentro de poucos milhares de anos”.
6. Chris Scarre (Org.), *The Human Past: World Prehistory and the Development of Human Societies*. Londres: Thames and Hudson, 2005, pp. 214-5.
7. Bruce Pascoe, em *Dark Emu: Black Seeds: Agriculture or Accident?* (Broome, Australia: Magabala Books, 2014), descreve muitas técnicas de cultivo dos indígenas australianos; as foices estão descritas em loc. 456, Kindle.
8. Trata-se de um argumento central de Jared Diamond em *Guns, Germs, and Steel*.
9. Peter Bellwood, *First Migrants: Ancient Migration in Global Perspective*. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2013, p. 124.
10. Smil, op. cit., loc. 2075, Kindle.
11. Merry Wiesner-Hanks (Org.), *Cambridge World History*, vol. 2. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, pp. 221 e 224-8.
12. Robin Dunbar, *Human Evolution*. Nova York: Penguin, 2014, p. 77.

## 9. CIVILIZAÇÕES AGRÁRIAS

1. Richard Lee, “What Hunters Do for a Living, or, How to Make Out on Scarce Resources”, em *Man the Hunter*, R. Lee e I. DeVore (Org.). Chicago: Aldine, 1968.
2. Chris Scarre (Org.). *The Human Past: World Prehistory and the Development of Human Societies*. Londres: Thames and Hudson, 2005, p. 403.
3. Citado em Alfred J. Andrea e James H. Overfield, *The Human Record: Sources of Global History*, vol. 1, 4. ed. Boston: Wadsworth, 2008, pp. 23-4.
4. Citado em Robert C. Tucker (Org.). *The Marx-Engels Reader*, 2. ed. Nova York: W. W. Norton, 1978, p. 608.
5. Hans J. Nissen, “Urbanization and the Techniques of Communication: The Mesopotamian City of Uruk During the Fourth Millennium BCE”, em *Cambridge World History*, vol. 3, Merry Wiesner-Hanks (Org.). Cambridge: Cambridge University Press, 2015, pp. 115-6.
6. Mark McClish e Patrick Olivelle (Org.). *The Arthashastra: Selections from the Classic Indian Work on Statecraft*. Indianápolis: Hackett Publishing, 2012, seções 1.4.13-15, Kindle.
7. Ibid., seções 1.4.1-1.4.4, 1.5.1.
8. Ibid., seção 2.36.3.
9. Ibid., seção 2.35.4.
10. Thomas Piketty, *Capital in the Twenty-First Century*. Trad. Arthur Goldhammer. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2014, p. 270, e ver p. 258, tabela 7.2. [Ed. bras. *O capital no século XXI*. Trad. Monica Baumgarten de Bolle. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2014.]

## 10. À BEIRA DO MUNDO DE HOJE

1. Grace Karskens, *The Colony: A History of Early Sydney*. Nova Gales do Sul: Allen and Unwin, 2009, loc. 756-79, Kindle.

2. A intensificação da caça global por novos recursos naturais está bem descrita em John Richards, *The Unending Frontier: Environmental History of the Early Modern World*. Berkeley: University of California Press, 2006.

3. Alfred W. Crosby, *Ecological Imperialism: The Biological Expansion of Europe, 900-1900*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. [Ed. bras. *Imperialismo ecológico: A expansão biológica da Europa, 900-1900*. Trad. José Augusto Ribeiro e Carlos Afonso Malferrari. São Paulo: Companhia de Bolso, 2011.]

4. Felipe Fernández-Armesto, *Pathfinders: A Global History of Exploration*. Nova York: W. W. Norton, 2007, pp. 161 ss.

5. David Wootton, *The Invention of Science: A New History of the Scientific Revolution*. Nova York: Penguin, 2015, p. 68.

6. Citado em Steven J. Harris, “Long-Distance Corporations, Big Sciences, and the Geography of Knowledge”, *Configurations* 6, 1998, p. 269.

7. Wootton, op. cit., p. 37.

8. Ibid., p. 54.

9. Ibid., p. 35.

10. Ibid., pp. 5-6 e 8-9.

11. Margaret Jacob e Larry Stewart, *Practical Matter: Newton’s Science in the Service of Industry and Empire, 1687-1851*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2004, p. 16.

12. David Christian, “Living Water”: *Vodka and Russian Society on the Eve of Emancipation*. Oxford: Oxford University Press, 1990.

13. E. A. Wrigley, *Energy and the English Industrial Revolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, loc. 298-306, Kindle. Malthus, Jevons, Ricardo e Mill também aceitavam que o mundo natural estabelece limites ao crescimento; ver a discussão em Donald Worster, *Shrinking the Earth: The Rise and Decline of American Abundance*. Oxford: Oxford University Press, 2016, pp. 44-9.

14. Alfred W. Crosby, *Children of the Sun: A History of Humanity’s Unappeasable Appetite for Energy*. Nova York: W. W. Norton, 2006, p. 60.

15. Wrigley, op. cit., loc. 2112, Kindle.

16. Sobre a história do motor de Newcomen e suas conexões com a revolução científica, ver Wootton, op. cit., capítulo 14.

17. Wrigley, op. cit., loc. 2112, Kindle.

18. Daniel Yergin, *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power*. Nova York: Free Press, 1991, capítulo 1.

19. *Ibid.*, p. 16.

## 11. O ANTROPOCENO: LIMIAR 8

1. Graham Allison e Philip Zelikow, *Essence of Decision: Explaining the Cuban Missile Crisis*, 2. ed. Nova York: Longman, 1999, p. 271.
2. Angus Maddison, *The World Economy: A Millennial Perspective*. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2001, p. 127.
3. Tim Lenton, *Earth Systems Science: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2016, p. 82.
4. Ha-Joon Chang, *Economics: The User's Guide*. Nova York: Pelican, 2014, p. 429, baseado em dados do Banco Mundial. [Ed. bras. *Economia: modo de usar — Um guia básico dos principais conceitos econômicos*. Trad. Isa Maria Lando e Rogério Galindo. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2015.]
5. Lenton, op. cit., pp. 96-7.
6. O cientista era Wally Broecker. Citado em David Christian, “Anthropocene Epoch”, em *The Berkshire Encyclopedia of Sustainability, Vol. 10: The Future of Sustainability*. Ray Anderson et al. (Org.). Barrington, MA: Berkshire Publishing, 2012, p. 22.
7. Jan Zalasiewicz e Colin Waters, “The Anthropocene”, em *The Oxford Research Encyclopedia, Environmental Science*. Oxford: Oxford University Press, 2015, pp. 4-5.

## 12. PARA ONDE VAI TUDO ISSO?

1. A trilogia de Marte de Kim Stanley Robinson — *Red Mars* (1993), *Green Mars* (1994), *Blue Mars* (1996) — apresenta um relato de ficção científica rico e vívido de como pode ser a colonização de Marte.

2. Joseph Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, 2. ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1968, p. 46.

3. J. S. Mill, “Of the ‘Stationary State’”, em *The Principles of Political Economy*, Google Books, <<http://www.efm.bris.ac.uk/het/mill/book4/bk4ch06>>.

4. Johan Rockström et al., “A Safe Operating Space for Humanity”, *Nature* 461, 24 de setembro de 2009, pp. 472-5; atualizado em Will Steffen et al., “Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet”, *Science*, janeiro de 2015, pp. 1-15.

5. Steffen et al., op. cit., p. 1.

6. A ideia de um Antropoceno maduro é explorada em David Grinspoon, *Earth in Human Hands: Shaping Our Planet’s Future* (Nova York: Grand Central Publishing, 2016). Tomei emprestadas algumas das ideias desta seção de Paul Raskin, *Journey to Earthland: The Great Transition to Planetary Civilization* (Boston: Tellus Institute, 2016).

7. Detalhes do relato seguinte foram tomados do maravilhoso livro de Sean Carroll *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*. Nova York: Dutton, 2016, loc. 878, Kindle.

## Leituras adicionais

As notas indicam alguns dos livros que considero mais úteis para tópicos específicos. No entanto, a maioria das obras citadas nas notas são recentes, e elas não incluem muitos textos clássicos que estão agora datados, como *The Outline of History* [*O esboço da história*], de H. G. Wells, e o maravilhoso *Cosmos*, de Carl Sagan. A lista a seguir se concentra principalmente em livros que apontam uma lente grande-angular para o passado, de modo que ela pode ser considerada uma bibliografia introdutória de obras sobre a grande história e a história moderna das origens, e de livros que abordam alguns dos principais temas da grande história.

## LIVROS E ARTIGOS

- Alvarez, Walter. *A Most Improbable Journey: A Big History of Our Planet and Ourselves*. Nova York: W. W. Norton, 2016. Uma exploração pessoal da história da grande história feita pelo geólogo que mostrou que foi um asteroide que acabou com os dinossauros. (Em português: *A viagem mais improvável: Uma grande história de nosso planeta e de nós mesmos*. São Paulo: Arte & Ciência, 2018.)
- Brown, Cynthia Stokes. *Big History: From the Big Bang to the Present*. 2. ed. Nova York: New Press, 2012. Uma versão da história da grande história. (Em português: *A grande história: Do big bang aos dias de hoje*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2010.)
- Bryson, Bill. *A Short History of Nearly Everything*. Nova York: Doubleday, 2003. Um relato maravilhoso e muito legível da evolução de nossa compreensão científica do universo. (Em português: *Breve história de quase tudo*. São Paulo: Companhia da Letras, 2005.)
- Chaisson, Eric. *Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001. Esse livro examina a ligação entre fluxos de energia-densidade e complexidade crescente.
- Christian, David. *Maps of Time: An Introduction to Big History*. 2. ed. Berkeley: University of California Press, 2011. Publicado primeiramente em 2004. Uma das primeiras tentativas modernas de contar a história da grande história.
- \_\_\_\_\_. *This Fleeting World: A Short History of Humanity*. Great Barrington, MA: Berkshire Publishing, 2008. Uma história curta da humanidade.
- \_\_\_\_\_. “What Is Big History?” *Journal of Big History* 1, n. 1, 2017, pp. 4-19, <<https://journalofbighistory.org/index.php/jbh>>.
- Christian, David, Cynthia Stokes Brown e Craig Benjamin. *Big History: Between Nothing and Everything*. Nova York: McGraw-Hill, 2014. Livro didático universitário sobre a grande história.
- Macquarie University Big History Institute. *Big History*. Londres: DK Books, 2016. Um relato lindamente ilustrado da história da grande história.
- Rodrigue, Barry, Leonid Grinin e Andrey Korotayev (Org.). *From Big Bang to Galactic Civilizations: A Big History Anthology, Vol. 1: Our Place in the Universe*. Delhi: Primus Books, 2015. Uma antologia de ensaios.
- Spier, Fred. *Big History and the Future of Humanity*. 2. ed. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2015. Uma tentativa ambiciosa de extrair algumas das principais ideias teóricas que estão por trás da grande história.

## OUTRAS FONTES SOBRE GRANDE HISTÓRIA

Bill Gates financiou a criação do Big History Project, um programa gratuito de grande história on-line para escolas de ensino médio. A grande história agora tem sua própria organização acadêmica (a Associação Internacional de Grande História) e a Universidade Macquarie criou um Instituto de Grande História para promover o ensino e a pesquisa dessa matéria.

Uma TED Talk que dei em 2011 oferece uma breve introdução à ideia da grande história; ela está disponível em <[https://www.ted.com/talks/david\\_christian\\_big\\_history](https://www.ted.com/talks/david_christian_big_history)>.

APÊNDICE — ESTATÍSTICAS SOBRE A HISTÓRIA DA HUMANIDADE

ESTATÍSTICAS SOBRE A HISTÓRIA HUMANA NAS ÉPOCAS DO HOLOCENO E DO ANTROPOCENO*						
ERA	A: ANO O = 2000 A.C.	B: POP. (MILHÕES)	C: USO TOTAL DE ENERGIA MILHÕES GJ/ ANO (= ,001 EXAJOULES) (= B*D)	D: USO DE ENERGIA PER CAP. GJ/CAP/ ANO (1 <sup>o</sup> . 3 = EST. MÁX.)	E: EXPECTATIVA DE VIDA (ANOS) 1 <sup>o</sup> . 3 = EST. MÁX.	F: MAIOR POVOAÇÃO POP. (1000) 1 <sup>o</sup> = EST. MÁX.
HOLOCENO	-10000	5	15	3	20	1
	-8000					3
	-6000					5
	-5000	20	60	3	20	45
	-2000	200	1000	5	25	1000
ANTROPOCENO	-1000	300	3000	10	30	1000
	-200	900	20700	23	35	1100
	-100	1600	43200	27	40	1750
	0	6100	457500	75	67	27000
	10	6900	517500	75	69	

\* Colunas A até E baseadas em Vaclav Smil, *Harvesting the Biosphere*, loc. 4528, Kindle; coluna F baseada em Ian Morris, *Why the West Rules — for Now*, pp. 148-9, mais 10 mil de dados interpolados.

# Glossário

*Uma lista de termos técnicos ou palavras que são usados de modo diferente neste livro.*

ACREÇÃO: processo pelo qual matéria em órbita em torno de uma estrela se reúne para formar planetas, luas e asteroides.

AGRICULTURA: conjunto de tecnologias que possibilitou que os seres humanos maximizassem os fluxos de energia e os recursos disponíveis, mediante a manipulação do meio ambiente, para aumentar a produção de plantas e animais que achavam úteis.

ANÃ BRANCA: estrela morta e densa que explodiu suas camadas externas e vai esfriar durante muitos bilhões de anos.

ANO-LUZ: distância percorrida pela luz no vácuo durante um único ano terrestre, aproximadamente 9,5 trilhões de quilômetros.

ANTIMATÉRIA: partículas subatômicas que são idênticas a outras partículas subatômicas, mas possuem cargas opostas, como pósitrons (elétrons com cargas positivas); quando a matéria e a antimatéria se encontram, elas se anulam e se transformam em energia pura.

ANTROPOCENO: período mais recente da história em que os seres humanos se tornaram uma força dominante na mudança da biosfera; proposta como uma nova época geológica, que vem depois do Holoceno.

APRENDIZADO COLETIVO: processo, exclusivo dos seres humanos, pelo qual a informação é compartilhada entre indivíduos com tal precisão e em tal volume que se acumula de geração em geração; é a chave para o crescente controle de informações da nossa espécie e da biosfera.

ARBITRAGEM: comprar barato em um mercado e vender caro em outro mercado para obter grandes lucros.

ARCHAEA OU ARQUEA: organismos procarióticos unicelulares; archaea é um dos três principais domínios da vida. *Ver também* bactérias e eucariontes.

ÁTOMO: menor partícula de matéria comum que consiste em prótons, nêutrons e elétrons; a matéria atômica talvez represente apenas 5% da massa do universo. *Ver também* energia escura e matéria escura.

ATP (trifosfato de adenosina): molécula usada em todas as células vivas para transportar energia.

**BACTÉRIAS:** organismos procariotas unicelulares no domínio da Eubacteria, um dos três principais domínios da vida. *Ver também* archaea e eucariontes.

**BIG BANG:** ideia cosmológica paradigmática que surgiu na década de 1960 para explicar o surgimento do nosso universo a partir de uma pequena e densa concentração de energia há cerca de 13,82 bilhões de anos.

**BIOSFERA:** esfera do planeta Terra dominada e moldada pela vida e pelos subprodutos de organismos vivos.

**BURACO NEGRO:** região tão densa que nada pode escapar de sua atração gravitacional, nem mesmo a luz; muitas vezes formado a partir do colapso de uma estrela supermassiva no final de sua vida. Pode haver buracos negros no centro de todas as galáxias.

**CAÇA E COLETA:** tecnologias características do período paleolítico, baseadas na coleta de recursos do meio ambiente e uma quantidade limitada de processamento.

**CAÇADORES-COLETORES ABASTADOS:** indivíduos sedentários como os natufianos, usualmente encontrados em regiões de excepcional abundância natural.

**CAPITALISMO:** sistema social dominado por atividade comercial e mercadores nos quais os governos favorecem o comércio porque grande parte de sua receita vem do comércio.

**CARBONO:** elemento 6 na tabela periódica; o elemento fundamental nos organismos vivos graças ao virtuosismo com o qual se liga a si mesmo e a outros elementos.

**CATALISADOR:** molécula (geralmente uma proteína) que facilita reações químicas específicas ao diminuir a energia de ativação necessária sem que a própria molécula seja alterada pela reação.

**CEFEIDAS, VARIÁVEIS:** estrelas cujo brilho varia conforme um padrão regular. Existem dois tipos principais e, como a taxa de variação está relacionada ao seu brilho intrínseco, sua distância pode ser estimada para que possam ser usadas como velas astronômicas-padrão para medir distâncias astronômicas.

**CICLOS DE MILANKOVITCH:** variações na órbita e inclinação da Terra que afetam a quantidade de energia que o planeta recebe do Sol; essas variações ajudam a explicar o ciclo das eras glaciais durante a época do Pleistoceno.

**CIÊNCIA:** tradição moderna de estudo rigoroso, baseado em provas, do mundo e do universo, desenvolvida a partir da revolução científica do século XVII.

**CIVILIZAÇÕES AGRÁRIAS:** comunidades de milhões de pessoas sustentadas pela agricultura com cidades, Estados, burocracias, exércitos, hierarquias sociais e escrita.

**COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS:** materiais orgânicos enterrados e fossilizados, principalmente carvão, petróleo e gás natural, que contêm reservas antigas de energia da fotossíntese; são as principais fontes de energia do mundo moderno.

**COMPLEXIDADE:** entidades complexas têm mais partes móveis do que entidades mais simples, e essas partes estão vinculadas de maneiras precisas que geram novas propriedades emergentes.

**CONDIÇÕES CACHINHOS DOURADOS:** as raras condições e os ambientes especiais que são “perfeitos” para permitir o surgimento de novas formas de complexidade.

COSMOLOGIA: estudo do universo e sua evolução.

CRESCENTE FÉRTIL: o arco de terras bem regadas ao redor da Mesopotâmia onde a agricultura apareceu pela primeira vez.

CROSTA: camada superficial da Terra, composta principalmente de rochas mais leves, como granitos e basaltos, que resfriaram o suficiente para se solidificar; é onde vive a maioria dos organismos.

DATAÇÃO RADIOMÉTRICA: técnica de datação desenvolvida em meados do século XX baseada na decomposição comum de isótopos radioativos; a linha do tempo deste livro não poderia ter sido construída sem técnicas de datação radiométrica.

DESVIO PARA O VERMELHO (*redshift*): mudança das linhas de absorção em direção à extremidade vermelha do espectro; indicação de que um objeto astronômico está se afastando da Terra. Uma prova fundamental de que o universo está se expandindo.

DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL: gráfico de distribuição que mostra a relação entre o brilho intrínseco ou luminosidade das estrelas (a quantidade de energia que elas emitem) versus sua cor (ou temperatura da superfície); para os astrônomos, uma maneira poderosa de classificar diferentes tipos de estrelas e suas diferentes maneiras de evoluir.

DIFERENCIAÇÃO: processo pelo qual a Terra primitiva se aqueceu, derreteu e foi ordenada em camadas de densidade decrescente, entre elas o núcleo, o manto e a crosta.

DNA: ácido desoxirribonucleico, a molécula que transporta a informação genética da maioria dos organismos vivos.

DOMESTICAÇÃO: modificação genética de uma espécie à medida que ela evolui com outra espécie; fundamental para a agricultura.

EFEITO DOPPLER: mudança aparente na frequência de radiação emitida à medida que os objetos se aproximam ou se afastam uns dos outros; usado em radares de velocidade da polícia e para detectar o movimento de estrelas e galáxias que se aproximam ou se afastam da Terra.

ELEMENTO: uma forma básica de matéria atômica. Cada elemento se distingue pelo número de prótons em seu núcleo; os elementos são classificados dentro da tabela periódica de acordo com suas propriedades distintivas, e existem em torno de 92 elementos estáveis.

ELETROMAGNETISMO: uma das quatro formas fundamentais de energia. É potente em pequenas escalas, tem formas positivas e negativas e é a forma mais importante de energia em química e biologia.

ELÉTRON: partícula subatômica de carga negativa; normalmente orbita núcleos atômicos.

EMERGÊNCIA: ver propriedades emergentes.

ENERGIA: o potencial para as coisas acontecerem, se moverem ou mudarem. Em nosso universo, a energia assume quatro formas principais — gravidade, eletromagnetismo e forças nucleares fortes e fracas —, mas ela também existe na forma de energia escura.

ENERGIA DE ATIVAÇÃO: uma injeção inicial de energia que inicia reações que podem gerar muito mais energia, como um fósforo que deflagra um incêndio florestal.

ENERGIA ESCURA: energia cuja natureza e cuja fonte ainda não são compreendidas, mas que podem ser responsáveis pela expansão acelerada do universo e por talvez 70% da massa do universo.

ENERGIA LIVRE: energia que não flui aleatoriamente e assim pode ser posta a trabalhar (por exemplo, a energia da água que flui através de uma turbina).

ENERGIA TÉRMICA: a energia cinética (ou energia do movimento) que impulsiona o movimento aleatório de todas as partículas da matéria; somente na temperatura de zero absoluto é que a matéria perde toda a energia térmica. *Ver* temperatura.

ENTROPIA: tendência do universo de se tornar menos estruturado de acordo com a segunda lei da termodinâmica.

ENZIMA: uma molécula bioquímica que age como um catalisador, facilitando reações em células que, de outro modo, exigiriam inputs muito maiores de energia de ativação.

ÉON ARQUEANO: uma das quatro principais divisões na história do planeta Terra, de 4 bilhões a 2,5 bilhões de anos atrás.

ÉON FANEROZOICO: uma das quatro principais divisões da história do planeta Terra, de cerca de 540 milhões de anos atrás até hoje; a era dos grandes organismos ou “vida grande”.

ÉON HADEANO: uma das quatro principais divisões da história do planeta Terra; começou há 4,6 bilhões de anos, quando a Terra se formou e terminou há cerca de 4 bilhões de anos.

ÉON PROTEROZOICO: uma das quatro principais divisões da história do planeta Terra, de cerca de 2,5 bilhões até 540 milhões de anos atrás.

ERA AGRÁRIA: época da história humana dominada pelas tecnologias agrícolas; começou depois da última era glacial e terminou há dois ou três séculos.

ERAS GLACIAIS: períodos intercalados com eras interglaciais mais quentes que começaram há cerca de 2,6 milhões de anos, no início da época do Pleistoceno.

ESPAÇO-TEMPO: segundo Einstein, espaço e tempo são mais bem compreendidos como partes de uma única estrutura universal, que ele chamou de espaço-tempo.

ESPECTROSCÓPIO: instrumento que divide a luz em frequências distintas, usado para determinar a composição química de objetos astronômicos.

ESTRELA: corpo astronômico formado quando reações de fusão começam no centro de um corpo da matéria em colapso; estrelas são reunidas em galáxias pela gravidade.

EUCARIONTES OU EUCARIOTAS: membros do Eukarya, um dos três domínios da vida, os eucariontes são constituídos de células com organelas internas. Os primeiros eucariontes evoluíram através de fusões entre organismos dos outros dois domínios (procariontes) da vida, Eubacteria e Archaea; todos os organismos multicelulares consistem em células eucarióticas. *Ver também* archaea, bactérias, procariontes.

EXPLOSÃO CAMBRIANA: repentina proliferação de grandes organismos com partes duras do corpo há cerca de 540 milhões de anos.

*fire-stick farming* (agricultura do fogo, queimada): tecnologia paleolítica baseada na queima periódica do solo para aumentar sua produtividade.

**FÍSICA QUÂNTICA:** estudo dos fenômenos no nível subatômico, onde é impossível identificar a posição ou o movimento exato das partículas, de modo que as leis físicas devem ser formuladas como probabilidades.

**FORÇA NUCLEAR FORTE:** uma das quatro formas fundamentais de energia. Opera em escalas subatômicas, prendendo quarks em prótons e nêutrons e mantendo juntos núcleos atômicos.

**FORÇA NUCLEAR FRACA:** uma das quatro formas fundamentais de energia; atua em escalas subatômicas e é responsável por muitas formas de degradação nuclear.

**FÓTON:** partícula sem massa de energia eletromagnética que se move à velocidade da luz no vácuo e que também tem qualidades ondulatórias.

**FOTOSSÍNTESE:** captação de energia da luz solar por plantas ou organismos semelhantes a plantas para potencializar seu metabolismo.

**FUSÃO:** ocorre quando os prótons colidem de forma tão violenta que superam a repulsão de suas cargas elétricas positivas e se unem pela força nuclear forte; a fusão é acompanhada por uma enorme liberação de energia, pois alguma matéria se transforma em energia. Fonte da energia das bombas H e da energia emitida pelas estrelas.

**GALÁXIA:** um agrupamento de milhões ou bilhões de estrelas unidas pela gravidade; nossa galáxia é a Via Láctea.

**GÁS:** estado da matéria em que moléculas ou átomos não estão fortemente ligados entre si.

**GASES DE EFEITO ESTUFA:** gases como o dióxido de carbono e o metano que absorvem e retêm energia da luz solar; em quantidades suficientemente grandes, os gases de efeito estufa tendem a elevar as temperaturas na superfície da Terra.

**GENOMA:** informação armazenada no DNA de cada célula que regula como ela funciona e permite que ela faça cópias precisas de si mesma.

**GIGANTE VERMELHA:** estrela moribunda, como Betelgeuse, na constelação de Órion, que se expandiu e tem uma superfície mais fria (mais vermelha).

**GLOBALIZAÇÃO:** a crescente escala das redes de intercâmbio até que, depois de 1500, elas começaram a alcançar o mundo inteiro.

**GRAVIDADE:** uma das quatro formas fundamentais de energia, que, embora fraca, opera em grandes escalas e tende a unir tudo com massa ou energia. Einstein mostrou que a gravidade funciona distorcendo a geometria do espaço-tempo.

**HÉLIO:** elemento químico de número atômico 2 (dois prótons no núcleo). Segundo elemento mais abundante no universo; quimicamente inerte.

**HIDROGÊNIO:** elemento químico com número atômico 1 (um próton em seu núcleo); o mais abundante no universo.

**HISTÓRIA DAS ORIGENS:** relato da evolução de todo o espaço e tempo com base no melhor conhecimento disponível para uma determinada comunidade; as histórias das origens fazem parte de todas as principais tradições religiosas e educacionais e proporcionam uma maneira potente de entender o lugar de alguém no espaço e no tempo.

HOLOCENO: época geológica vigente desde o fim da última era glacial, que começou em torno de 11,7 mil anos atrás.

HOMEOSTASE: estado de equilíbrio; os organismos vivos mantêm a homeostase detectando mudanças em seus ambientes e ajustando-se a essas mudanças.

HOMINÍNIOS: símios bípedes que são ancestrais de nossa própria espécie e evoluíram desde que nossos ancestrais divergiram da linhagem evolutiva que leva aos chimpanzés, há cerca de 7 milhões de anos.

*homo sapiens*: espécie de grande símio a que pertencem todos os leitores deste livro.

INFLAÇÃO: em cosmologia, um período de expansão extremamente rápida do universo no início do primeiro segundo após o big bang.

INFORMAÇÃO: regras subjacentes que determinam como as mudanças podem ocorrer. Algumas dessas regras são universais, mas os organismos vivos precisam ser capazes de detectar e reagir às *informações locais*, regras que funcionam apenas em seu ambiente imediato. *Informação* também pode se referir ao conhecimento de como as coisas funcionam.

INFORMÍVORO: entidade que consome informações como carnívoros consomem carne; todos os organismos vivos são informívoros.

ISÓTOPO: átomos do mesmo elemento com o mesmo número de prótons, mas diferente número de nêutrons.

KELVIN: semelhante à escala Celsius, mas que começa no zero absoluto (-273,15°C); o ponto de congelamento da água é 273,15 K e 0°C.

LIMIARES DE COMPLEXIDADE CRESCENTE: momentos de transição em que algo novo e mais complexo aparece, com novas propriedades emergentes; a história contada neste livro é construída em torno de oito limiares principais de complexidade crescente.

LINHAS DE ABSORÇÃO: linhas escuras que aparecem quando a luz das estrelas é analisada com um espectroscópio; elas indicam a presença de determinados elementos que absorveram um pouco da energia da luz estelar e podem ser usadas para detectar o movimento de objetos remotos à medida que as linhas escuras se deslocam para a extremidade vermelha ou azul do espectro.

LÍQUIDO: estado fluido da matéria no qual átomos ou moléculas estão unidos, mas que podem fluir adiante e ao redor uns dos outros; o líquido toma a forma de seu recipiente.

LUA: o corpo planetário que orbita a Terra, formado a partir de uma colisão desta com outro corpo planetário logo após a formação da Terra.

LUCA: último ancestral comum universal; o ancestral inferido de todos os organismos vivos da Terra.

MANTO: camada semiderretida da Terra abaixo da crosta e acima do núcleo, com cerca de 3 mil quilômetros de espessura.

MAPA: no uso comum, uma imagem esquemática de uma paisagem ou região geográfica; usado muitas vezes neste livro num sentido metafórico para significar as imagens que criamos do

espaço e tempo e de todo o universo e sua história, a fim de identificar o nosso próprio lugar no esquema das coisas.

**MATÉRIA:** a “coisa” física do universo que ocupa o espaço. Einstein mostrou que a matéria consiste em energia comprimida e pode ser reconvertida em energia (por exemplo, durante a fusão de prótons).

**MATÉRIA ESCURA:** matéria cujos efeitos gravitacionais são detectáveis, mas cujas fonte e forma exatas ainda não são compreendidas; é responsável por talvez 25% da massa do universo.

**MEGAFUNA:** grandes mamíferos; muitos foram levados à extinção no final do Paleolítico, logo após a chegada dos humanos à Australásia, à Sibéria e à América.

**MEIA-VIDA:** o tempo que leva para a metade de um isótopo radioativo se decompor. Conceito crucial para datação radiométrica, já que meias-vidas diferentes permitem que diferentes isótopos sejam usados para datar eventos e objetos em diferentes escalas de tempo.

**METABOLISMO:** capacidade dos organismos vivos de explorar e usar os fluxos de energia de seu ambiente.

**METAZOÁRIOS:** organismos multicelulares; “vida grande”.

**METEORITO:** detrito espacial que pousa na Terra; a maioria dos meteoritos mal mudou desde a criação do sistema solar, de modo que eles fornecem informações sobre a formação e evolução do sistema solar.

**MOLÉCULA:** vários átomos unidos por ligações químicas.

**MUDANÇA DE FASE:** mudança de estado, como a mudança do estado gasoso para o estado líquido ou sólido.

**MULTIVERSO:** ideia especulativa de que pode haver múltiplos universos, talvez com leis fundamentais e formas de energia ligeiramente diferentes.

**NATUFIANOS:** termo arqueológico para “caçadores-coletores abastados” que viveram no Crescente Fértil, a leste do Mediterrâneo, entre cerca de 14,5 mil e 11,5 mil anos atrás.

**NÊUTRON:** partícula subatômica encontrada usualmente em núcleos atômicos; massa semelhante à de um próton, mas sem carga elétrica.

**NÍVEL TRÓFICO:** nível da cadeia alimentar através do qual a energia fotossintética é transferida das plantas para os herbívoros, daí para os carnívoros, até as elites das sociedades humanas; quantidades significativas de energia são perdidas em cada nível, de modo que as populações em níveis mais altos são sempre menores.

**NÚCLEO 1)** O núcleo denso de um átomo, povoado principalmente por nêutrons e prótons. 2) Região central e mais densa da Terra, dominada por ferro e níquel; fonte do campo magnético da Terra.

**ORDEM (estrutura):** arranjos não aleatórios ou padronizados de matéria e energia.

**OXIGÊNIO:** elemento químico, número atômico 8; tremendamente reativo.

**PANGEIA:** supercontinente que existiu de cerca de 300 milhões a 200 milhões de anos atrás.

**PARADIGMA:** ideia que é amplamente aceita por pesquisadores em um campo particular de estudo e que unifica informações dentro desse campo; por exemplo, cosmologia do big bang

(astronomia), tectônica de placas (geologia) e seleção natural (biologia). Baseado na obra do historiador da ciência Thomas Kuhn.

**PARALAXE:** movimento aparente de um objeto contra o seu fundo, à medida que o observador se move; usado por agrimensores e astrônomos para calcular a distância de objetos remotos ou estrelas próximas.

**PARTÍCULAS SUBATÔMICAS:** componentes de átomos, como prótons, nêutrons e elétrons.

**PERÍODO PALEOLÍTICO:** a era da história humana desde o aparecimento de nossa espécie, há cerca de 200 mil anos, até o final da última era glacial e o início da agricultura, há cerca de 11 mil anos.

**PLANETA:** corpo astronômico formado em órbita ao redor de uma estrela quimicamente enriquecida.

**PLASMA:** estado da matéria em que as temperaturas são tão altas que as partículas subatômicas não podem se ligar para formar átomos.

**PLEISTOCENO:** época geológica de cerca de 2,6 milhões a cerca de 11,7 mil anos atrás; dominado por eras glaciais.

**PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA:** *ver* termodinâmica.

**PROCARIONTES:** organismos unicelulares sem núcleos, dos domínios de Eubacteria e Archaea; as primeiras formas de vida na Terra eram procariontes. *Ver* eucariontes.

**PROPRIEDADES EMERGENTES:** novas propriedades que surgem como estruturas existentes e ligam-se para formar novas estruturas com propriedades que não estão presentes em suas partes componentes. Por exemplo, as estrelas têm propriedades que não estão presentes na matéria atômica com a qual são construídas.

**PRÓTON:** partícula subatômica com carga elétrica positiva encontrada em núcleos atômicos; o número de prótons determina o número atômico de um elemento.

**QUARK:** partícula subatômica a partir da qual prótons e nêutrons são criados pela força nuclear forte.

**QUIMIOSMOSE:** movimento de íons para baixo de seu gradiente de concentração através de uma membrana. Nas células, a ATP sintase na membrana celular aproveita essa energia para carregar as moléculas de ATP.

**RADIAÇÃO ADAPTATIVA:** períodos de rápida evolução e diversificação biológica, muitas vezes após episódios de extinção em massa.

**RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICRO-ONDAS (CMBR):** radiação remanescente do momento, cerca de 380 mil anos após o big bang, em que se formaram os primeiros átomos; ainda hoje detectável e uma das provas cruciais para a cosmologia do big bang.

**RADIOATIVIDADE:** tendência de muitos núcleos atômicos de se fragmentarem espontaneamente, emitindo partículas subatômicas.

**RELIGIÃO:** tradições espirituais, algumas extremamente institucionalizadas, que incluem, todas elas, ao que parece, alguma forma de história das origens.

RESPIRAÇÃO: absorção de oxigênio pelos animais; é também o uso de oxigênio das células para liberar energia armazenada nos açúcares.

RNA: ácido ribonucleico, um parente próximo do DNA que está presente em todas as células e que pode carregar informações genéticas e realizar trabalho metabólico.

SEDENTARISMO: modo de vida não nômade, no qual os indivíduos e as famílias permanecem, em sua maioria, perto de sua base domiciliar em residências permanentes. Associado geralmente à agricultura, mas às vezes a caçadores-coletores abastados.

SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA: *ver* termodinâmica.

SELEÇÃO NATURAL: a ideia central de Charles Darwin de que os organismos sobrevivem e se reproduzem ou deixam de fazê-lo, dependendo de como se encaixam em seus ambientes; esse mecanismo é o motor fundamental da evolução.

SER HUMANO: membro da espécie *Homo sapiens*.

SIMBIOSE: relação de dependência tão próxima entre duas espécies que elas começam a afetar como cada espécie evolui; a relação humana com plantas e animais domesticados é uma forma de simbiose.

SOL: nossa estrela, fonte da maior parte da energia que alimenta a biosfera.

SÓLIDO: estado da matéria no qual átomos e moléculas estão ligados de modo tão forte que não podem alterar facilmente sua posição.

SUPERNOVA: explosão gigantesca no final da vida de uma grande estrela; muitos elementos químicos novos são gerados dentro de supernovas.

SUPERNOVA TIPO 1A: um tipo de supernova cujo brilho intrínseco é conhecido, por isso pode ser usado como uma vela astronômica-padrão.

TABELA PERIÓDICA: tabela dos elementos químicos, inicialmente concebida por Dmítri Mendeleiev, que agrupa elementos com características semelhantes.

TECTÔNICA DAS PLACAS: ideia paradigmática que surgiu na década de 1960 para explicar como as correntes de convecção no interior do manto da Terra, movidas pelo calor no núcleo, impulsionam o movimento das placas tectônicas na superfície da Terra.

TEMPERATURA: em uso científico, uma medida da energia cinética média (ou energia de movimento) dos átomos que compõem alguma coisa.

TERMODINÂMICA: estudo de como a energia flui e as mudanças se formam. A primeira lei da termodinâmica afirma que a quantidade total de energia no universo é fixa ou “conservada”; a segunda lei afirma que a energia tende a formas cada vez mais aleatórias ou caóticas e, portanto, a longo prazo, o universo tende à aleatoriedade ou entropia crescente. *Ver* entropia.

TERRA: planeta em que vivemos, com sua carga possivelmente única de organismos vivos.

TRABALHO: na teoria termodinâmica, a capacidade de gerar mudança não aleatória.

TRANSIÇÃO DEMOGRÁFICA: nos tempos modernos, o declínio da mortalidade impulsionou o crescimento populacional, mas a crescente urbanização acabou por reduzir as taxas de fecundidade, de modo que o crescimento populacional está desacelerando hoje; a transição

demográfica transformou as atitudes em relação à família e aos papéis de gênero que eram dominantes na maioria das sociedades camponesas.

UNIVERSO: a totalidade de todas as coisas das quais temos conhecimento baseado em evidências; formado no big bang.

VELA ASTRONÔMICA-PADRÃO: um objeto astronômico, como uma variável cefeida ou uma supernova do tipo 1a, cuja distância pode ser determinada, o que permite que ela seja usada para medir as distâncias para outros objetos.

VENTO SOLAR: fluxo de partículas subatômicas carregadas do Sol.

VIDA: propriedade emergente de todos os organismos vivos. Difícil de definir com precisão, pois só conhecemos a vida no planeta Terra, mas suas qualidades incluem a capacidade de manter a homeostase, metabolizar, reproduzir e evoluir.

ZONAS MUNDIAIS: grandes regiões do mundo habitado (Afro-Eurásia, Australásia, América e Pacífico) que estavam quase totalmente desconectadas umas das outras antes de 1500, de tal modo que a história evoluiu de maneiras distintas em cada região do mundo.



DAVID CHRISTIAN fundou com Bill Gates o Big History Project e é cocriador, diretor e professor da Macquarie University Big History School. Faz palestras pelo mundo todo, inclusive no Fórum Econômico de Davos, e seu TED Talk já teve quase 10 milhões de visualizações. É autor de artigos e de diversos outros livros de história.

Copyright © 2018 by David Christian

Todos os direitos reservados.

*Grafia atualizada segundo o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, que entrou em vigor no Brasil em 2009.*

*Título original*

Origin Story: A Big History of Everything

*Capa*

Carlos di Celio

*Foto de capa*

FlashMovie / Shutterstock

*Preparação*

Joaquim Toledo Jr.

*Revisão*

Dan Duplat

Isabel Cury

ISBN 978-85-5451-474-7

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORA SCHWARCZ S.A.

Rua Bandeira Paulista, 702, cj. 32

04532-002 — São Paulo — SP

Telefone (11) 3707-3500

[www.companhiadasletras.com.br](http://www.companhiadasletras.com.br)

[www.blogdacompanhia.com.br](http://www.blogdacompanhia.com.br)

[facebook.com/companhiadasletras](https://facebook.com/companhiadasletras)

[instagram.com/companhiadasletras](https://instagram.com/companhiadasletras)

[twitter.com/cialetras](https://twitter.com/cialetras)

# SOBRE A TIRANIA

vinte lições  
do século XX  
para o presente

COMPANHIA DAS LETRAS

TIMOTHY  
SNYDER

# Sobre a tirania

Snyder, Timothy

9788543809656

168 páginas

[Compre agora e leia](#)

Dias após a eleição de Donald Trump, o historiador Timothy Snyder postou um texto no Facebook que rapidamente foi compartilhado por dezenas de milhares de pessoas. Ele começava assim: "Não somos mais sábios do que os europeus que viram a democracia dar lugar ao fascismo, ao nazismo ou ao comunismo no século XX. Nossa única vantagem é poder aprender com a experiência deles". O post então apresentava vinte lições tiradas do século XX e adaptadas para o mundo de hoje — ideia que Snyder desenvolve e aprofunda em Sobre a tirania, um livro curto, para ser lido numa sentada, mas ao qual se deve voltar regularmente para recuperar o fôlego e a inspiração que permitam enfrentar os desafios do presente.

[Compre agora e leia](#)

**PESSOAS  
NORMAIS**



**SALLY  
ROONEY**

  
COMPANHIA DAS LETRAS

# Pessoas normais

Rooney, Sally

9788554514686

408 páginas

[Compre agora e leia](#)

Uma história única e envolvente sobre dois jovens que devem enfrentar a eletricidade do primeiro amor em meio às sutilezas das classes sociais e dos problemas familiares. Sally Rooney é a voz da geração millennial. Na escola, no interior da Irlanda, Connell e Marianne fingem não se conhecer. Ele é a estrela do time de futebol, ela é solitária e preza por sua privacidade. Mas a mãe de Connell trabalha como empregada na casa dos pais de Marianne, e quando o garoto vai buscar a mãe depois do expediente, uma conexão estranha e indelével cresce entre os dois adolescentes — contudo, um deles está determinado a esconder a relação. Um ano depois, ambos estão na universidade, em Dublin. Marianne encontrou seu lugar em um novo mundo enquanto Connell fica à margem, tímido e inseguro. Ao longo dos anos da graduação, os dois permanecem próximos, como linhas que se encontram e separam conforme as oportunidades da vida. Porém, enquanto Marianne se embrenha em um espiral de autodestruição e Connell começa a duvidar do sentido de suas escolhas, eles precisam entender até que ponto estão dispostos a ir para salvar um ao outro. Uma história de amor entre duas pessoas que tentam ficar separadas, mas

descobrem que isso pode ser mais difícil do que tinham imaginado."O fenômeno literário da década." — The Guardian

[Compre agora e leia](#)

CHIMAMANDA  
NGOZI ADICHIE

SEJAMOS  
TODOS  
FEMINISTAS



# Sejamos todos feministas

Adichie, Chimamanda Ngozi

9788543801728

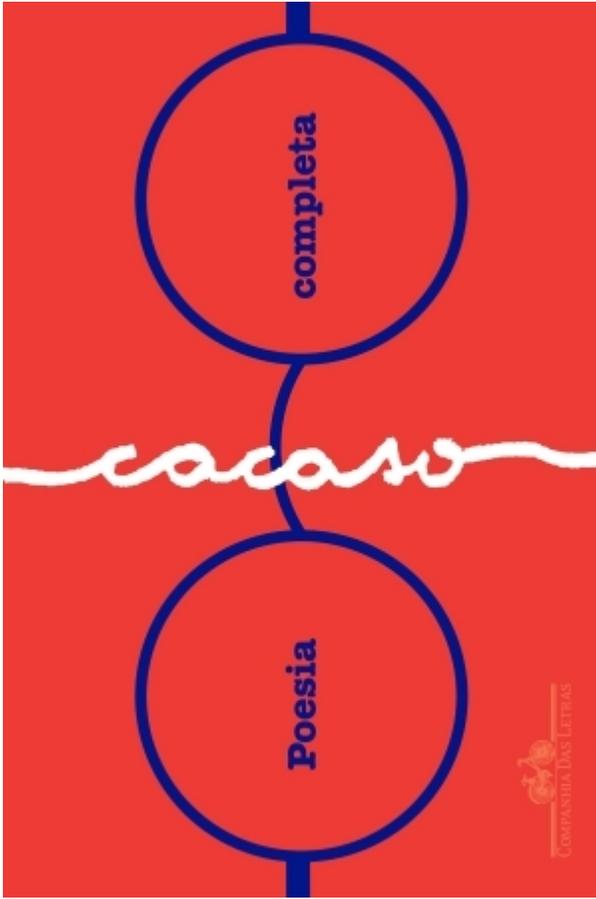
24 páginas

[Compre agora e leia](#)

O que significa ser feminista no século XXI? Por que o feminismo é essencial para libertar homens e mulheres? Eis as questões que estão no cerne de *Sejamos todos feministas*, ensaio da premiada autora de *Americanah* e *Meio sol amarelo*. "A questão de gênero é importante em qualquer canto do mundo. É importante que comecemos a planejar e sonhar um mundo diferente. Um mundo mais justo. Um mundo de homens mais felizes e mulheres mais felizes, mais autênticos consigo mesmos. E é assim que devemos começar: precisamos criar nossas filhas de uma maneira diferente. Também precisamos criar nossos filhos de uma maneira diferente." Chimamanda Ngozi Adichie ainda se lembra exatamente da primeira vez em que a chamaram de feminista. Foi durante uma discussão com seu amigo de infância Okoloma. "Não era um elogio. Percebi pelo tom da voz dele; era como se dissesse: 'Você apoia o terrorismo!'" Apesar do tom de desaprovação de Okoloma, Adichie abraçou o termo e — em resposta àqueles que lhe diziam que feministas são infelizes porque nunca se casaram, que são "anti-africanas", que odeiam homens e maquiagem — começou a se intitular uma "feminista feliz e africana que não odeia homens, e que gosta de

usar batom e salto alto para si mesma, e não para os homens". Neste ensaio agudo, sagaz e revelador, Adichie parte de sua experiência pessoal de mulher e nigeriana para pensar o que ainda precisa ser feito de modo que as meninas não anulem mais sua personalidade para ser como esperam que sejam, e os meninos se sintam livres para crescer sem ter que se enquadrar nos estereótipos de masculinidade.

[Compre agora e leia](#)



# Poesia completa

Cacaso

9788554512880

456 páginas

[Compre agora e leia](#)

A reunião de toda a poesia de um dos principais expoentes da geração mimeógrafo. Com verso coloquial, breve e divertido — "rápido e rasteiro" —, Cacaso aliou bom-humor, sagacidade e vasto repertório intelectual em uma obra que deixou sua marca incontornável nos anos 1970. Professor, ensaísta, poeta e letrista, o mineiro foi um dos protagonistas da poesia marginal, período em que a postura arrojada, do "desbunde", se firmou como resposta ao autoritarismo dos anos de chumbo. O livro abarca a produção de 1967, com o título de estreia, Palavra cerzida, segue até o derradeiro Mar de mineiro, de 1982, e inclui uma farta seção de poemas inéditos, organizada por Heloisa Jahn, além de uma amostra da breve incursão do poeta nos contos. Poesia completa traz ainda um caderno de imagens com reproduções dos diários de Cacaso e textos de Roberto Schwarz, Heloisa Buarque de Hollanda, Francisco Alvim, Vilma Arêas e Mariano Marovatto sobre o poeta que se definiu com precisão: "Exagerado em matéria de ironia e em matéria de matéria moderado".

[Compre agora e leia](#)

Pós-escrito da nova edição

**BRASIL:**  
**UMA** Lilia M. Schwarcz  
e Heloisa M. Starling  
**BIOGRAFIA**



# Brasil: uma biografia - Pós-escrito

Schwarcz, Lilia Moritz

9788554510763

24 páginas

[Compre agora e leia](#)

Neste pós-escrito do monumental Brasil: uma biografia, Lilia Moritz Schwarcz e Heloisa Murgel Starling lançam um olhar atualizado sobre os acontecimentos recentes e decisivos do país. A democracia posta em xeque, os desdobramentos das manifestações populares e o impeachment de Dilma Rousseff são alguns dos temas tratados pelas pesquisadoras, que mantêm o rigor na pesquisa e o texto fluente da obra lançada em 2015. Tanto continuidade dessa nova (e pouco convencional) biografia como análise independente do cenário brasileiro dos últimos anos, este é um convite para conhecer um país cuja história — marcada pelas falhas nos avanços sociais e pela violência — permanece em construção.

[Compre agora e leia](#)