

Poucos cientistas viveram tanto para acompanhar as transformações de sua disciplina quanto Ernst Mayr. Ao longo de seus oitenta anos de carreira, o biólogo alemão testemunhou vários momentos cruciais da história das ciências da vida. Iniciou sua carreira, na década de 1920, antes que o darwinismo se firmasse como teoria central da biologia. Na década de 1940, criou, ao lado de Theodosius Dobzhansky, Julian Huxley e George Gaylord Simpson, a Moderna Síntese, que deu à teoria da evolução o seu formato atual. E viu florescer a biologia molecular.

Neste livro, Mayr lança mão dessa vivência ímpar para transcender as vestes de cientista praticante: constrói a primeira obra verdadeira de filosofia da biologia. Revolta-se contra a filosofia da ciência tradicional, feita para a física e à qual as ciências da vida nunca se conformaram. Explica que estas diferem fundamentalmente daquela ao se constituírem de conceitos e narrativas históricas, não de experiências replicáveis em laboratório. Desafia o paradigma das revoluções científicas de Thomas Kuhn, explicando como ele desmonta diante da obra de Darwin. E pondera sobre as grandes questões que se apresentam aos biólogos: as perguntas do tipo "o quê?" (as origens da biodiversidade), "como?" (o desenvolvimento dos organismos do zigoto até a fase adulta) e "por quê?" (como as criaturas evoluem).

Mayr tenta ainda mostrar que compreender a biologia é fundamental para a vida humana moderna. Sugere que os

ISTO É BIOLOGIA

Ficando Gues
Borhetti
Dep. do Biotônio

ERNST MAYR

Isto é biologia

A ciência do mundo vivo

Tradução

Claudio Angelo


COMPANHIA DAS LETRAS

Copyright © 1997 by Ernst Mayr

Título original

This is biology — The science of the living world

Capa

Victor Burton

Foto de capa

Science Photo Library/ LatinStock

Preparação

Cacilda Guerra

Índice remissivo

Luciano Marchiori

Revisão

Otacílio Nunes

Ana Maria Barbosa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Mayr, Ernst, 1904-2005

Isto é biologia : a ciência do mundo vivo / Ernst Mayr ; tradução
Claudio Angelo. — São Paulo : Companhia das Letras, 2008.

Título original. This is biology : the science of the living world

Bibliografia

ISBN 978-85-359-1180-0

1. Biologia I. Título.

08-00432

CDD-574

Índice para catálogo sistemático:

1. Biologia 574

[2008]

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORA SCHWARCZ LTDA.

Rua Bandeira Paulista, 702, cj. 32

04532-002 — São Paulo — SP

Telefone: (11) 3707-3500

Fax: (11) 3707-3501

www.companhiadasletras.com.br

*Em memória de minha mãe, Helene
Pusinelli Mayr, a quem devo tanto*

Sumário

Prefácio	9
1. O que significa “vida”?	19
2. O que é ciência?	47
3. Como a ciência explica o mundo natural?	73
4. Como a biologia explica o mundo vivo?	97
5. A ciência avança?	116
6. Como se estruturam as ciências da vida?	151
7. Perguntas do tipo “O quê?”: o estudo da biodiversidade .	173
8. Perguntas do tipo “Como?”: a construção de um novo indivíduo	207
9. Perguntas do tipo “Por quê?”: a evolução dos organismos	238
10. Que perguntas faz a ecologia?	278
11. Qual é o lugar do homem na evolução?	303
12. Pode a evolução explicar a ética?	331
Notas	359

Bibliografia	382
Glossário	396
Agradecimentos	408
Guia dos tópicos abordados	410
Índice remissivo	416

Prefácio

Alguns anos atrás, o então presidente da França Valéry Giscard d'Estaing declarou o século xx o “século da biologia”. Se isso não é inteiramente preciso para todo este século, decerto o é para a sua segunda metade. Hoje a biologia é um campo florescente de investigação. Testemunhamos revoluções sem precedentes na genética, na biologia celular e na neurociência, bem como avanços espetaculares na biologia evolutiva, na antropologia física e na ecologia. Toda uma indústria surgiu a partir da pesquisa em biologia molecular; seus resultados são claramente visíveis em campos tão distintos quanto a medicina, a agricultura, a reprodução animal e a nutrição humana, para citar só alguns.

Mas o panorama nem sempre foi assim tão brilhante para a biologia. Desde a Revolução Científica do século xvii até bem depois da Segunda Guerra Mundial, para a maioria das pessoas “ciência” era sinônimo de ciências “exatas” — física, química, mecânica, astronomia —, que se baseavam na matemática e enfatizavam o papel das leis universais. Durante todo esse tempo, a física foi tida como o modelo ideal de ciência. O estudo do mundo

vivo, por outro lado, era considerado um esforço inferior. Mesmo hoje as pessoas continuam a ter idéias profundamente erradas sobre as ciências da vida. Por exemplo, o fracasso em compreender a biologia aparece freqüentemente nos meios de comunicação, seja o assunto o ensino da evolução, as medidas da inteligência, a possibilidade de detectar vida extraterrestre, a extinção das espécies ou os riscos do tabagismo.

Mais lamentavelmente ainda, muitos biólogos têm, eles mesmos, uma noção obsoleta das ciências da vida. Os biólogos modernos tendem a ser extremamente especializados. Eles podem saber tudo sobre uma dada espécie de ave, sobre hormônios sexuais, comportamento parental, neuroanatomia ou a estrutura molecular dos genes. No entanto, com freqüência são desinformados no que diz respeito àquilo que acontece fora de seu campo de especialização. Raramente os biólogos têm tempo de dar um passo para fora dos avanços em sua especialidade e olhar para as ciências da vida em sua totalidade. Todos os geneticistas, embriologistas, taxonomistas e ecólogos se consideram biólogos, mas a maioria deles tem pouca noção do que essas várias especialidades têm em comum e de como elas diferem fundamentalmente das ciências físicas. Lançar luz sobre essas questões é um dos maiores objetivos deste livro.

Sou um naturalista quase desde que me entendo por gente, e meu amor pelas plantas e pelos animais me levou a uma abordagem holística do mundo vivo. Felizmente, o ensino de biologia na escola secundária alemã em que estudei, por volta de 1920, era centrado no organismo completo e em suas interações com o ambiente animado e inanimado. Hoje, diríamos que o foco era em história da vida, comportamento e ecologia. Física e química, que também estudei na escola secundária, eram algo inteiramente diferente, tendo pouco a ver com plantas e animais.

Durante os anos em que fui estudante de medicina, estava empolgado demais e ocupado demais com a área médica para

prestar atenção a questões básicas como “O que é biologia?” e “O que torna a biologia uma ciência?”. Com efeito, não havia na época — ao menos nas universidades alemãs — nenhuma disciplina chamada “biologia”. Aquilo que hoje chamaríamos de biologia era ensinado nos departamentos de zoologia e botânica, os quais enfatizavam o estudo dos tipos estruturais e de sua filogenia. É claro que havia cursos em fisiologia, genética e outras disciplinas mais ou menos experimentais, mas havia pouca integração entre elas, e o arcabouço conceitual dos experimentalistas era incompatível com o dos zoólogos e botânicos, cujo trabalho era baseado na história natural.

Depois de trocar a medicina pela zoologia (mais especificamente o estudo das aves), em seguida à conclusão de minhas provas pré-clínicas, tive aulas de filosofia na Universidade de Berlim. Mas lá, para minha decepção, não se construíam pontes entre os conteúdos das ciências biológicas e os da filosofia. No entanto, estava em desenvolvimento nos anos 1920 e 1930 uma disciplina que seria um dia batizada de “filosofia da ciência”. Na década de 1950, entrei em contato com os ensinamentos desse campo e me decepcionei amargamente mais uma vez. Aquilo não era filosofia da ciência; era uma filosofia da lógica, da matemática e das ciências físicas. Não tinha quase nada a ver com o trabalho dos biólogos. Naquela ocasião, sentei-me e fiz uma lista com as principais generalizações da biologia publicadas em livros e artigos científicos — para algumas das quais, naquela época, eu mesmo já havia contribuído —, e não encontrei nenhuma sequer que fosse coberta adequadamente pela literatura filosófica; a maioria não era nem mencionada.

Ainda assim, naquele momento eu não tinha planos de dar uma contribuição à história e à filosofia da ciência. Meus vários ensaios sobre esses tópicos foram resultado de convites para conferências e simpósios, que me forçavam a deixar de lado temporariamente minhas pesquisas em teoria evolutiva e sistemática.

Minha única intenção era destacar quão diferente a biologia era da física em certos aspectos. Em 1960, por exemplo, fui convidado por Daniel Lerner, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, a participar de uma série de palestras sobre causa e efeito. Eu estivera interessado no problema da causalidade em biologia desde meu artigo sobre os chamarizes-comuns, de 1926,* e outro artigo sobre a origem da migração das aves, de 1930. Portanto, aproveitei aquela oportunidade para organizar minhas idéias a respeito desse tema. Havia muito que eu tinha consciência da diferença de categoria entre o mundo inanimado e o vivo. Ambos os mundos obedecem às leis universais descobertas e analisadas pelas ciências físicas, mas os organismos vivos obedecem também a um segundo conjunto de causas, o das instruções do programa genético. Este segundo tipo de causalidade não existe no mundo inanimado. É claro que não fui o primeiro biólogo a descobrir a dualidade de causa nos organismos, mas meu artigo derivado daquela série de palestras, publicado em 1961, foi o primeiro a oferecer uma análise detalhada do assunto.

Na verdade, meus vários ensaios sobre as diferenças entre as ciências da vida e as ciências físicas não eram tão dirigidos aos filósofos e físicos, mas mais aos meus companheiros biólogos, que sem querer acabaram adotando muitos conceitos fisicalistas em seus escritos. Por exemplo, a afirmação de que cada atributo dos sistemas vivos complexos pode ser explicado por meio do estudo de seus menores componentes (moléculas, genes ou o que quer que seja) soava absurda para mim. Os organismos vivos formam uma hierarquia de sistemas cada vez mais complexos, que vai de moléculas, células e tecidos até organismos inteiros, populações e espé-

* Para se qualificar como assistente no Museu de História Natural de Berlim, Mayr produziu uma tese de doutorado sobre a migração dos chamarizes-comuns (*Serín finches*), uma espécie de pássaro europeu. (N. T.)

cies. Em cada sistema mais elevado emergem características que não poderiam ser previstas somente a partir do conhecimento dos seus componentes.

À primeira vista, pensei que o fenômeno da emergência, como agora ele é chamado, se restringisse ao mundo vivo; e, de fato, numa palestra que dei em Copenhague no começo da década de 1950 cheguei a afirmar que a emergência era uma das características diagnósticas do mundo vivo. Naquela época, o conceito de emergência era considerado algo quase metafísico. Portanto, quando o físico Niels Bohr, que estava na platéia, se levantou para falar durante o período de discussão, eu estava totalmente preparado para uma refutação devastadora. No entanto, para minha grande surpresa, ele não fez nenhuma objeção ao meu conceito de emergência, mas somente à minha afirmação de que tal conceito estabelecia uma fronteira entre as ciências físicas e as biológicas. Citando o caso da água, cuja “aquosidade” não poderia ser prevista a partir das características de seus dois componentes, o hidrogênio e o oxigênio, Bohr declarou que a emergência era algo freqüente no mundo inanimado.

Além do reducionismo, outra *bête noire* particularmente abjeta para mim era o pensamento tipológico, mais tarde batizado de “essencialismo” pelo filósofo Karl Popper. Ele consistia em classificar a variedade encontrada na natureza em tipos fixos (classes), invariáveis e claramente demarcados em relação a outros tipos. Esse conceito, que remonta a Platão e à geometria pitagórica, era particularmente inadequado à biologia evolutiva e de populações, onde não se encontram classes, e sim agregados de indivíduos únicos, ou seja, populações. Explicar fenômenos variáveis na natureza viva em termos de populações — o chamado pensamento populacional — parece difícil para quem é acostumado ao pensamento fisicalista. Expliquei esse problema repetidas vezes ao físico Wolfgang Pauli, que estava sempre ansioso para entender o que nós,

biólogos, tínhamos em mente. Ele finalmente chegou perto de entender a questão quando lhe sugeri que pensasse em um gás que consistisse em apenas cem moléculas, cada uma diferente das outras na direção e na velocidade de seu movimento. Ele chamou aquilo de “gás individual”.

A biologia também foi mal compreendida por muitos dos que tentaram construir uma história da ciência. Quando *A estrutura das revoluções científicas*, de Thomas Kuhn, foi publicado, em 1962, fiquei intrigado com o motivo da enorme comoção causada pela obra. É claro, Kuhn havia refutado algumas das teses mais irreais da filosofia da ciência tradicional e chamado a atenção para a importância de fatores históricos. Mas o que ele oferecia em troca me parecia tão irreal quanto. Onde, na história da biologia, estavam as revoluções cataclísmicas e os períodos de ciência normal postulados pela teoria de Kuhn? Até onde eu conhecia a história da biologia, tais coisas não existiam. Sem dúvida, *A origem das espécies*, de Darwin, publicado em 1859, foi um livro revolucionário. Mas, quando de seu lançamento, as idéias sobre a evolução já estavam no ar havia um século. Além disso, a teoria de Darwin da seleção natural — o mecanismo-chave para a adaptação evolutiva — não foi plenamente aceita até quase um século após a publicação da obra. Nesse meio-tempo houve revoluções menores, mas nunca período algum de ciência “normal”. A tese de Kuhn, fosse ou não válida para as ciências físicas, não servia para a biologia. Os historiadores com formação em ciências físicas não pareciam alcançar tudo o que aconteceu durante três séculos no estudo dos organismos vivos.

Comecei a ver, cada vez mais claramente, que a biologia era um tipo de ciência muito diferente das ciências físicas; ela diferia delas fundamentalmente no seu objeto de estudo, na sua história, nos seus métodos e na sua filosofia. Se, por um lado, todos os processos biológicos são compatíveis com as leis da física e da química,

os organismos vivos não podem ser reduzidos a essas leis, e as ciências físicas não podem explicar muitos aspectos da natureza que são exclusividade do mundo vivo. As ciências físicas clássicas, nas quais se baseava a filosofia da ciência clássica, eram dominadas por um conjunto de idéias inadequadas ao estudo dos organismos: elas incluíam o essencialismo, o determinismo, o universalismo e o reducionismo. A biologia, ela própria, compreende o pensamento populacional, a probabilidade, o acaso, o pluralismo, a emergência e as narrativas históricas. Era preciso uma nova filosofia da ciência que pudesse incorporar as abordagens de todas as ciências, incluindo a física e a biologia.

Quando planejava este volume, no entanto, eu tinha em mente uma tarefa mais modesta. Queria escrever uma “história de vida” da biologia, que apresentasse ao leitor a importância e a riqueza da biologia como um todo, e que ao mesmo tempo ajudasse o biólogo individual a lidar com um problema cada vez mais formidável: a explosão da informação. A cada ano, novos cientistas se juntam àqueles já trabalhando na área e aumentam a avalanche de publicações. Praticamente todos os biólogos com quem já conversei reclamam de não ter mais tempo para se manter atualizados com a literatura de sua própria área de especialidade, muito menos das disciplinas adjacentes. E, no entanto, são as contribuições de fora do domínio estreito de um cientista que muitas vezes se mostram decisivas para um avanço conceitual. Novos rumos de pesquisa são freqüentemente avistados quando se dá um passo para fora da própria área e se passa a enxergá-la como uma parte do esforço maior de explicar o mundo vivo em toda a sua maravilhosa diversidade. Espero que este livro possa fornecer um arcabouço conceitual a partir do qual os biólogos possam incorporar essa perspectiva mais ampla a suas agendas específicas de pesquisa.

Não há lugar em que a explosão de informação seja mais aparente que na biologia molecular. Uma discussão detalhada desse

campo está ausente deste volume, não porque eu ache que a biologia molecular seja menos importante que outras partes da biologia, mas exatamente pelo motivo oposto. Quer lidemos com fisiologia, quer com desenvolvimento, genética, neurobiologia ou comportamento, os processos moleculares são em última análise responsáveis por tudo que acontece, e todo dia os pesquisadores fazem novas descobertas em todos esses domínios. Nos capítulos 8 e 9 destaquei algumas dessas grandes generalizações (“leis”) descobertas pelos biólogos moleculares. Ainda assim, parece-me que, embora tenhamos conseguido identificar muitas árvores nessa área, ainda não conseguimos enxergar a floresta. Outros podem discordar; em todo caso, um panorama completo da biologia molecular requer uma competência que não possuo.

O mesmo pode ser dito de outra disciplina extremamente importante, a biologia dos processos mentais. Ainda estamos numa fase de reconhecimento desse terreno, e simplesmente não domino o conhecimento necessário de neurobiologia e psicologia para me atrever a uma análise ampla dele. Uma última área que não está coberta em grande detalhe neste volume é a genética. O programa genético desempenha um papel decisivo em todos os aspectos da vida de um organismo: sua estrutura, seu desenvolvimento, suas funções e suas atividades. Desde a ascensão da biologia molecular, a ênfase na genética tem se deslocado para a genética do desenvolvimento, que se tornou praticamente um ramo da biologia molecular, e por esta razão não tentei passar esse campo em revista. No entanto, espero que meu tratamento da biologia como um todo seja útil para uma eventual “história de vida” desta e de outras áreas fundamentais da biologia que não são o foco direto deste volume.

Se os biólogos, físicos, filósofos, historiadores e outros com um interesse profissional nas ciências da vida descobrirem idéias úteis nos capítulos que se seguem, este livro terá cumprido um de

seus objetivos primários. Mas toda pessoa instruída deveria ter uma compreensão de conceitos biológicos básicos — evolução, biodiversidade, competição, extinção, adaptação, seleção natural, reprodução, desenvolvimento e vários outros que são discutidos neste livro. A superpopulação, a destruição do meio ambiente e a questão da degradação urbana* não podem ser resolvidas por avanços tecnológicos, nem pela literatura ou pela história, mas em última análise somente por medidas que se baseiem na compreensão das raízes biológicas desses problemas. O “conhece-te a ti mesmo” a que os gregos nos incitam requer antes de tudo o conhecimento das nossas origens biológicas. Ajudar os leitores a entender melhor o nosso lugar no mundo vivo e nossa responsabilidade para com o resto da natureza é o grande objetivo deste livro.

Cambridge, Massachusetts, setembro de 1996

* No original, *malaise of the inner cities*, expressão antigamente usada para descrever a degradação das regiões centrais das metrópoles americanas, habitadas pela parcela mais pobre da população e com condições precárias de habitação, saneamento e emprego. (N. T.)

1. O que significa “vida”?

Os humanos primitivos viviam perto da natureza. Todos os dias eles se viam às voltas com plantas e animais, como coletores, caçadores ou pastores. E a morte — de bebês e velhos, de mulheres no parto, de homens na guerra — estava sempre presente. Certamente nossos primeiros ancestrais pelejaram com a eterna pergunta: “O que é a vida?”

Talvez a princípio eles não fizessem distinção entre a vida num organismo e o espírito num objeto natural não-vivo. A maioria dos povos primitivos acreditava que um espírito pudesse residir em uma montanha ou uma nascente, assim como em uma árvore, um animal ou uma pessoa. Essa visão animista da natureza acabou se desfazendo, mas a crença de que “alguma coisa” numa criatura viva a distinguia da matéria inanimada e deixava o corpo no momento da morte continuou firme. Na Grécia antiga, essa alguma coisa nos seres humanos foi denominada “sopro vital”. Mais tarde, em especial na religião cristã, ela foi chamada de alma.

Na época de Descartes e da Revolução Científica, os animais (juntamente com as montanhas, os rios e as árvores) perderam o

direito de ter alma. Mas uma cisão dualista entre o corpo e a alma nos seres humanos continuou a ser aceita quase universalmente, e até hoje muita gente acredita nela. A morte era um problema intrigante para um dualista: por que essa tal alma haveria de morrer ou deixar o corpo de repente? Se a alma saía mesmo do corpo, será que ela ia para algum lugar específico, como um nirvana qualquer ou o céu? Somente quando Charles Darwin desenvolveu sua teoria da evolução por meio da seleção natural foi que uma explicação racional e científica da morte se tornou possível. August Weismann, um seguidor de Darwin do final do século XIX, foi o primeiro autor a explicar que uma sucessão rápida de gerações fornece o número de novos genótipos necessário para lidar permanentemente com um ambiente que se modifica. Seu ensaio sobre a morte e o morrer foi o começo de uma nova era no nosso entendimento do significado da morte.

Quando os biólogos e filósofos falam da “vida”, no entanto, eles não estão se referindo à vida (quer dizer, ao viver) em oposição à morte, e sim da vida em oposição à falta dela em um objeto inanimado. Elucidar a natureza dessa entidade chamada “vida” tem sido um dos principais objetivos da biologia. O problema, aqui, é que “vida” remete a alguma “coisa” — uma substância ou uma força — e, durante séculos, os filósofos e os biólogos tentaram, em vão, identificar essa força ou substância vital. Na realidade, o substantivo “vida” é meramente uma reificação do processo de viver. Ela não existe como entidade independente.¹ É possível lidar cientificamente com o processo de viver, algo impossível de fazer com a entidade abstrata “vida”. É possível descrever, e mesmo definir, o que é viver; é possível definir o que é um organismo vivo; e é possível tentar estabelecer uma fronteira entre vivo e não-vivo. Mais ainda, é possível até tentar explicar como a vida, enquanto processo, pode ser o produto de moléculas que não são, elas próprias, vivas.²

O que é vida, e como explicar os processos vivos, tem sido objeto de acalorada controvérsia desde o século XVI. Para resumir,

a situação era a seguinte: sempre houve um campo alegando que os organismos vivos não eram, na verdade, nada diferentes da matéria inanimada; algumas vezes essas pessoas foram chamadas de mecanicistas, mais tarde de fisicalistas. E sempre houve um campo oposto — os chamados vitalistas — reivindicando, por sua vez, que os organismos vivos possuíam propriedades que não poderiam ser encontradas na matéria inerte e que, portanto, conceitos e teorias biológicos não poderiam ser reduzidos às leis da física e da química. Em alguns períodos e centros intelectuais, os fisicalistas pareciam vencer o debate, e em outras épocas e locais os vitalistas pareciam prevalecer. Neste século [XX], ficou claro que ambos os lados estavam parcialmente certos e parcialmente errados.

Os fisicalistas acertaram ao insistir em que não há um componente metafísico da vida e que, no nível molecular, ela pode ser explicada de acordo com os princípios da física e da química. Ao mesmo tempo, os vitalistas estavam certos ao afirmar que, ainda assim, os organismos não são a mesma coisa que a matéria inerte, mas possuem diversas características autônomas, em particular seu programa genético historicamente adquirido, algo que não se conhece na matéria inanimada. Os organismos são sistemas multiordenados, bem diferentes de qualquer coisa encontrada no mundo inanimado. A corrente filosófica que terminou por incorporar os melhores princípios tanto do fisicalismo quanto do vitalismo (após descartar os excessos de ambos) ficou conhecida como organicismo, e é o modelo dominante hoje.

OS FISCALISTAS

As primeiras tentativas de produzir uma explicação natural (em oposição à sobrenatural) do mundo aconteceram na filosofia de vários pensadores gregos, entre eles Platão, Aristóteles, Epicuro

e muitos outros. Esse começo promissor, no entanto, foi em grande parte esquecido em séculos posteriores. A Idade Média foi dominada pela adesão estrita aos ensinamentos das Escrituras, que atribuíam tudo na natureza a Deus e às Suas leis. Mas o pensamento medieval, particularmente no folclore, também era caracterizado por uma crença em todo tipo de forças ocultas. Esse pensamento animista, mágico, foi enfim reduzido, se não eliminado, por uma nova forma de olhar para o mundo que foi apropriadamente batizada de “desencantamento do mundo” (Maier, 1938).³

As influências que levaram ao desencantamento do mundo foram várias. Elas incluíam não apenas os filósofos gregos, transmitidos ao Ocidente pelos árabes juntamente com a redescoberta dos seus escritos originais, mas também desenvolvimentos tecnológicos do fim da era medieval e do começo da Renascença. Havia grande fascínio por relógios e outros autômatos — na verdade, por quase todo tipo de máquina. Isso culminou na afirmação de Descartes de que todos os organismos, à exceção dos seres humanos, não eram nada *senão* máquinas.

Descartes (1596-1650) se tornou o porta-voz da Revolução Científica, que, com sua sede de objetividade e precisão, não podia aceitar idéias vagas, embebidas em metafísica e no sobrenatural, como a de uma alma em animais e plantas. Ao restringir aos humanos a posse da alma, e ao declarar que os animais não são nada mais que autômatos, Descartes cortou o nó górdio, por assim dizer. Com a mecanização da alma animal, ele completou o desencantamento do mundo.⁴

É um tanto difícil entender por que o conceito de organismo como máquina teve uma popularidade tão duradoura. Afinal, nenhuma máquina jamais se construiu sozinha, replicou-se, programou-se ou foi capaz de buscar a própria energia. A semelhança entre um organismo e uma máquina é por demais superficial. No entanto, esse conceito perdurou por boa parte deste século.

O sucesso de Galileu, Kepler e Newton em usar a matemática para reforçar suas explicações do cosmo também contribuiu para a mecanização da visão do mundo. Galileu (1623) capturou sucinatamente o prestígio da matemática na Renascença quando declarou que o livro da natureza “não pode ser entendido a não ser que primeiro se aprenda a compreender a linguagem e ler os caracteres em que está composto. Ele está escrito na linguagem da matemática, e seus caracteres são triângulos, círculos e outras figuras geométricas sem as quais é humanamente impossível entender uma palavra que seja dele; sem eles, vagamos em um labirinto escuro”.

O rápido desenvolvimento da física logo depois levou a Revolução Científica um passo adiante, transformando o mecanicismo mais genérico do período anterior em um fisicalismo mais específico, baseado em leis concretas sobre o funcionamento dos céus e da Terra.⁵

O movimento fisicalista teve o enorme mérito de refutar grande parte do pensamento mágico que caracterizara os séculos anteriores. Seu maior tento talvez tenha sido fornecer uma explicação natural dos fenômenos físicos e eliminar, dessa forma, grande parte da confiança no sobrenatural que antes era aceita por quase todo mundo. Se o mecanicismo, em particular o fisicalismo, sua cria, foi longe demais em alguns aspectos, isso era inevitável em se tratando de um movimento novo e enérgico. Mas, por causa de seu unilateralismo e de seu fracasso em explicar qualquer um que fosse dos fenômenos e processos específicos do organismo vivo, o fisicalismo induziu a uma rebelião. Esse contramovimento é geralmente descrito sob o termo guarda-chuva vitalismo.

Desde Galileu até os tempos modernos, tem havido na biologia um movimento de gangorra entre explicações estritamente mecanicistas da vida e as mais vitalistas. O cartesianismo chegou a seu ápice com a publicação de *L’homme machine* (1748), de De la Mettrie. O que se seguiu depois foi um florescimento vigoroso do

vitalismo, particularmente na França e na Alemanha, mas triunfos posteriores da física e da química no meio do século XIX inspiraram uma ressurgência fisicalista na biologia. Esta ficou em grande parte confinada à Alemanha, o que talvez não chegue a ser surpreendente, já que em nenhum outro lugar a biologia prosperou tanto no século XIX como na Alemanha.

O florescimento do fisicalismo

O movimento fisicalista do século XIX chegou em duas ondas. A primeira foi uma reação ao vitalismo moderado adotado por Johannes Müller (1801-58), que na década de 1830 trocou a fisiologia pura pela anatomia comparada, e o de Justus von Liebig (1803-73), conhecido por suas incisivas críticas que ajudaram a pôr um fim ao reinado do indutivismo. Essa reação partiu de quatro ex-alunos de Müller — Hermann Helmholtz, Emil DuBois-Reymond, Ernst Brücke e Matthias Schleiden. A segunda onda, que teve início por volta de 1865, é identificada com os nomes de Carl Ludwig, Julius Sachs e Jacques Loeb. Esses fisicalistas trouxeram contribuições inegavelmente importantes para a fisiologia. Helmholtz (juntamente com Claude Bernard, na França) eliminou a conotação vitalística do “calor animal”, e DuBois-Reymond desfez boa parte do mistério da fisiologia nervosa ao produzir uma explicação física (elétrica) para o funcionamento dos nervos. Schleiden fez avançar os campos da botânica e da citologia através de sua insistência no fato de que as plantas são feitas inteiramente de células, e que todos os elementos estruturais altamente diversificados das plantas são células ou produtos de atividade celular. Helmholtz, DuBois-Reymond e Ludwig tiveram papel de especial destaque na invenção de instrumentos cada vez mais sofisticados para fazer as medições precisas nas quais estavam interessados. Isso permitiu a eles, entre outras conquistas, descartar a existência de uma “força

vital”, ao mostrar que o trabalho poderia ser convertido em calor sem deixar resíduo. Toda a história da fisiologia escrita desde aquela época documentou essas e outras esplêndidas realizações.

Porém, a filosofia subjacente a essa escola fisicalista era bastante ingênua e inevitavelmente despertava desdém entre os biólogos com formação em história natural. Nos relatos históricos que registram os vários feitos dos fisicalistas, sua ingenuidade no tocante aos processos vitais tem sido freqüentemente ignorada. Mas não é possível entender a resistência apaixonada dos vitalistas às asserções dos fisicalistas a menos que se conheçam os reais enunciados explicativos oferecidos por estes.

É irônico que os fisicalistas tenham atacado os vitalistas por invocarem uma misteriosa “força vital” e, ainda assim, em suas próprias explicações, tenham usado fatores igualmente misteriosos, como “energia” e “movimentos”. As definições de vida e as descrições dos processos vitais formuladas pelos fisicalistas geralmente consistem em frases vazias. Por exemplo, o físico-químico Wilhelm Ostwald definiu um ouriço-do-mar como, da mesma forma que qualquer outro pedaço de matéria, “uma soma coerente e espacialmente discreta de quantidades de energia”. Para muitos fisicalistas, um enunciado vitalista inaceitável tornava-se aceitável quando a força vital era substituída pelo termo igualmente indefinido “energia”. Wilhelm Roux (1895), cujo trabalho fez a embriologia desabrochar, afirmou uma vez que o desenvolvimento de um organismo é “a produção da diversidade devido à distribuição desigual de energia”.

Ainda mais na moda que “energia” estava o termo “movimento” para explicar os processos vivos, inclusive os adaptativos e os de desenvolvimento. DuBois-Reymond (1872) escreveu que a compreensão da natureza “consiste em explicar todas as mudanças no mundo como produtos do movimento dos átomos”, ou seja, “reduzindo os processos naturais à mecânica dos átomos [...]”. Ao se demonstrar que as mudanças em todos os corpos naturais

podem ser explicadas como uma soma constante [...] de energia potencial e cinética, nada mais nessas mudanças restará por ser explicado". Seus contemporâneos não notaram que essas asserções eram apenas palavras vazias, sem evidências a consubstanciá-las e com pouquíssimo valor explicativo.

A crença na importância do movimento dos átomos não era só dos fisicalistas, mas até de alguns de seus adversários. Para Rudolf Kölliker (1886) — citologista suíço que reconheceu que os cromossomos no núcleo estão envolvidos na hereditariedade e que os espermatozoides são células —, o desenvolvimento era um fenômeno estritamente físico, governado por diferenças nos processos de crescimento: "É suficiente postular a ocorrência, nos núcleos, de movimentos regulares e típicos controlados pela estrutura do idioplasma".

Como exemplificado pelas frases do botânico Karl Wilhelm von Nägeli (1884), outra das explicações favoritas dos mecanicistas era invocar "movimentos das menores partes" para explicar "a mecânica da vida orgânica".⁶ O efeito do núcleo sobre o restante da célula — o citoplasma — era visto por E. Strasburger, um dos maiores botânicos da época, como "uma propagação de movimentos moleculares [...] de um modo que pode ser comparado à transmissão do impulso nervoso". Portanto, não envolvia o transporte de material; tal noção estava, é claro, completamente errada. Esses fisicalistas jamais se deram conta de que suas declarações sobre energia e movimento nunca explicaram realmente nada. Os movimentos, a menos que sejam dirigidos, são aleatórios, como o movimento browniano. Algo precisa dar direção a esses movimentos, e foi exatamente isso que seus oponentes vitalistas sempre enfatizaram.

A fraqueza de uma interpretação puramente fisicalista era particularmente óbvia nas explicações do processo de fertilização. Quando F. Miescher (aluno de His e Ludwig) descobriu o ácido nucléico, em 1869, ele pensou que a função do espermatozoide era de caráter puramente mecânico, a de iniciar a divisão celular; como

consequência de seu viés fisicalista, Miescher ignorou por completo o significado da própria descoberta. Jacques Loeb afirmou que os agentes realmente cruciais da fertilização não eram as nucleínas no espermatozoide, e sim os íons. É quase constrangedor ler a declaração de Loeb de que "*Branchipus* é um crustáceo de água doce que, se criado em uma solução salina concentrada, diminui de tamanho e sofre outras mudanças. Neste caso, é chamado de *Artemia*". A sofisticação dos fisicalistas em química, sobretudo em físico-química, não era acompanhada por seu conhecimento de biologia. Mesmo Sachs, que estudou tão diligentemente os efeitos de vários fatores extrínsecos sobre o crescimento e a diferenciação, parece jamais ter atinado com a questão de por que as sementes de várias espécies de planta, plantadas em condições idênticas de luz, água e nutrientes, haviam de dar origem a espécies inteiramente diferentes.

Talvez a escola mecanicista mais radical da biologia moderna tenha sido a da *Entwicklungsmechanik*,* fundada nos anos 1880 por Wilhelm Roux. Essa escola de embriologia representava uma rebelião contra o unilateralismo dos embriologistas comparativos, que só se interessavam por questões filogenéticas. O parceiro de Roux, o embriologista Hans Driesch, era a princípio ainda mais mecanicista, mas acabou se convertendo totalmente de mecanicista empedernido a vitalista extremo. Isso aconteceu quando ele dividiu um embrião de ouriço-do-mar no estágio de duas células em dois embriões de uma célula cada e observou que esses dois embriões não se tornavam meios organismos, como requeriam suas teorias mecanicistas, mas conseguiam compensar apropriadamente a separação e produzir larvas um pouco menores, porém perfeitas.

No seu devido tempo, o vazio e o absurdo dessas explicações puramente fisicalistas da vida se tornaram aparentes para a maioria dos biólogos, que, no entanto, com frequência se contentavam

* *Entwicklungsmechanik*: em alemão, mecânica do desenvolvimento. (N. T.)

em adotar a postura agnóstica de que os organismos e os processos vitais simplesmente não podiam ser explicados exhaustivamente pelo fisicalismo reducionista.

OS VITALISTAS

O problema de explicar a “vida” foi a ocupação dos vitalistas desde a Revolução Científica até grande parte do século XIX; isso não seria objeto de análise científica até a ascensão da biologia, após a década de 1820. Descartes e seus seguidores não haviam conseguido convencer a maioria dos estudiosos de plantas e animais de que não havia nenhuma diferença essencial entre os organismos vivos e a matéria inanimada. Ainda assim, após a ascensão do fisicalismo, esses naturalistas precisaram lançar um novo olhar sobre a natureza da vida e tentaram propor argumentos *científicos* (e não metafísicos ou teológicos) contra a teoria de Descartes dos organismos como máquinas. Essa necessidade levou ao surgimento da escola vitalista de biologia.⁷

As reações dos vitalistas às explicações fisicalistas foram diversificadas, uma vez que o próprio paradigma fisicalista era uma composição, não apenas no que ele alegava (que os processos vitais são mecânicos e podem ser reduzidos às leis da física e da química), mas também naquilo que falhava em responder (as diferenças entre os organismos vivos e a simples matéria, a existência de propriedades adaptativas mas muito mais complexas — a *Zweckmässigkeit** de Kant — em animais e plantas e as explicações evolutivas). Cada uma dessas asserções e omissões era criticada por um ou por outro oponente do fisicalismo. Alguns vitalistas se con-

* *Zweckmässigkeit*: termo filosófico alemão que pode ser traduzido como adaptação ou adequação a fins. (N. T.)

centraram em propriedades vitais inexplicadas, outros na natureza holística das criaturas vivas, outros ainda na adaptação ou no direcionamento (como no desenvolvimento do óvulo fertilizado).

Todos esses argumentos que se opunham aos vários aspectos do fisicalismo têm sido tradicionalmente agrupados dentro do vitalismo. Em alguma medida isso não é totalmente errado, já que os antifisicalistas defendiam as propriedades específicas da vida dos organismos. Ainda assim, o rótulo “vitalista” esconde a heterogeneidade desse grupo.⁸ Na Alemanha, por exemplo, alguns biólogos (que Lenoir chamava de teleomecanicistas) queriam explicar os processos fisiológicos mecanicamente, mas insistiam em que isso não dava conta de explicar tanto a adaptação quanto os processos dirigidos, como o desenvolvimento do óvulo fertilizado. Essas questões, legítimas, foram formuladas repetidas vezes por ilustres filósofos e biólogos de 1790 até o final do século XIX, mas tiveram uma influência notoriamente pequena sobre os escritos dos principais fisicalistas, como Ludwig, Sachs e Loeb.

O vitalismo, desde seu surgimento no século XVII, foi decididamente um contramovimento. Foi uma revolta contra a filosofia mecanicista da Revolução Científica e contra o fisicalismo, de Galileu a Newton. Ele resistiu apaixonadamente à doutrina de que o animal não é nada senão uma máquina e de que todas as manifestações da vida podem ser explicadas como sendo a matéria em movimento. Mas, por mais decididos e convincentes que fossem os vitalistas em sua rejeição do modelo cartesiano, eles eram igualmente indecisos e pouco convincentes em seu próprio esforço explicativo. Havia uma grande diversidade explanatória, mas não havia uma teoria coesa.

A vida, segundo um grupo de vitalistas, estava conectada ou a uma substância especial (que eles chamaram de protoplasma), que não podia ser encontrada na matéria inanimada, ou a um estado especial da matéria (como o estado coloidal), que, dizia-se, as ciên-

cias físico-químicas não estavam equipadas para analisar. Outro conjunto de vitalistas sustentava que há uma força especial (algumas vezes chamada *Lebenskraft*, *Entelechie* ou élan vital), distinta das forças com as quais lidam os físicos. Alguns dos que aceitavam a existência de tal força eram também teleologistas, que acreditavam que a vida existia para algum propósito específico. Outros autores invocavam forças psicológicas ou mentais (psicovitalismo, psicolamarckismo) para dar conta de aspectos dos organismos vivos que os fisicalistas não conseguiram explicar.

Aqueles que apoiavam a existência de uma força vital tinham visões altamente diversificadas sobre a natureza de tal força. Da metade do século XVII em diante, o agente vital foi caracterizado com mais frequência como um fluido (não um líquido), em analogia com a gravidade de Newton e com o calórico, o flogisto e outros “fluidos imponderáveis”. A gravidade era invisível e também o era o calor que fluía de um objeto quente para um frio; portanto, não era considerado problemático ou improvável que o fluido vital fosse também invisível, mesmo que não necessariamente sobrenatural. Por exemplo, o influente naturalista alemão do século XVIII J. F. Blumenbach (que escreveu extensamente sobre extinção, criação, catástrofes, mutabilidade e geração espontânea) considerava esse fluido vital, embora invisível, um objeto bastante real de estudo científico, assim como a gravidade.⁹ Esse conceito de fluido vital acabou sendo substituído pelo de força vital. Mesmo um cientista de grande reputação como Johannes Müller aceitou a força vital como sendo indispensável para explicar as manifestações da vida que de outro modo seriam inexplicáveis.

Na Inglaterra, todos os fisiologistas dos séculos XVI, XVII e XVIII tinham idéias vitalistas, e o vitalismo ainda tinha força no período de 1800 a 1840, nos escritos de J. Hunter, J. C. Prichard e outros. Na França, onde o cartesianismo fora particularmente poderoso, não surpreende que o contramovimento dos vitalistas

tenha tido igual vigor. Seus representantes mais destacados naquele país foram a Escola de Montpellier (grupo de médicos e fisiologistas vitalistas) e o histologista F. X. Bichat. Até Claude Bernard, que estudava objetos funcionais, como os sistemas nervoso e digestivo, e se considerava um adversário do vitalismo, na verdade acabaria apoiando diversas noções vitalistas. Além disso, a maioria dos lamarckistas era vitalista em sua maneira de pensar.

Foi na Alemanha que o vitalismo conheceu seu maior florescimento e atingiu sua maior diversidade. Georg Ernst Stahl, químico do final do século XVII e médico mais conhecido por sua teoria de combustão do flogisto, foi o maior opositor dos mecanicistas. Talvez tenha sido mais um animista que um vitalista, mas suas idéias tiveram um papel importante no ensino na Escola de Montpellier.

O ímpeto seguinte ao movimento vitalista na Alemanha foi a controvérsia entre a pré-formação e a epigênese, que dominou a biologia do desenvolvimento na segunda metade do século XVIII. Os pré-formacionistas sustentavam que as partes que compõem um adulto existem numa forma menor desde o começo do desenvolvimento. Os epigenesistas defendiam que as partes do adulto aparecem como produtos do desenvolvimento, mas não estão presentes como partes no começo. Em 1759, quando refutou a pré-formação e a substituiu pela epigênese, o embriologista Caspar Friedrich Wolff precisou invocar algum agente causal capaz de converter a massa completamente disforme do óvulo fertilizado em um adulto de uma dada espécie. Ele chamou esse agente de *vis essentialis*.

J. F. Blumenbach rejeitou a vaga *vis essentialis* e, em seu lugar, propôs que uma força formativa específica, *nisus formativus*, tinha um papel decisivo não apenas no desenvolvimento do embrião como também no crescimento, na regeneração e na reprodução. Ele aceitou ainda que outras forças, como a irritabilidade e a sensibilidade, contribuíam para a manutenção da vida. Blumenbach tinha uma atitude bastante pragmática a respeito dessas forças,

considerando-as essencialmente rótulos para processos observados por ele e cujas causas não conhecia. Elas eram para ele mais caixas-pretas do que princípios metafísicos.

O ramo da filosofia alemã chamado *Naturphilosophie*, proposto por F. W. J. Schelling e seus seguidores no começo do século XIX, era um tipo de vitalismo decididamente metafísico, mas as filosofias práticas de biólogos como Wolff, Blumenbach e mais tarde Müller eram mais antifisicalistas do que metafísicas. Müller tem sido tachado de metafísico não-científico, mas a acusação é injusta. Colecionador de plantas e borboletas desde a meninice, ele adquiriu o hábito do naturalista de olhar para os organismos de forma holística. Essa percepção faltava em seus alunos, que se inclinavam mais para a matemática e para as ciências físicas. Müller se deu conta de que o slogan “a vida é um movimento de partículas” era sem sentido e não tinha valor explicativo, e seu conceito alternativo de *Lebenskraft* (força vital), apesar de fracassado, estava mais próximo do conceito de um programa genético do que as explicações fisicalistas de seus alunos rebeldes.¹⁰

Muitos dos argumentos adiantados pelos vitalistas visavam explicar características específicas dos organismos que hoje são explicadas pela programação genética. Eles propuseram várias refutações perfeitamente válidas da teoria da máquina, mas, devido ao estado pouco desenvolvido das explicações biológicas disponíveis naquela época, não conseguiram chegar à explicação correta dos processos vitais que foram encontrados durante o século XX. Consequentemente, a maior parte da argumentação dos vitalistas era negativa. Da década de 1890 em diante Driesch afirmou, por exemplo, que o fisicalismo não podia explicar a auto-regulação nas estruturas embrionárias, a regeneração e a reprodução, e fenômenos psíquicos, como a memória e a inteligência. Ainda assim, é notável a frequência com que frases perfeitamente sensatas emergem dos escritos de Driesch toda vez que a palavra “*Entelechie*” é

substituída pela expressão “programação genética”. Esses vitalistas não só sabiam que alguma coisa estava faltando nas explicações mecanicistas como também descreveram em detalhe a natureza dos fenômenos e dos processos que os mecanicistas não conseguiram explicar.¹¹

Dadas as muitas fraquezas e mesmo contradições das explicações vitalistas, a ampla adoção do vitalismo e o tempo que ele persistiu podem parecer surpreendentes. Uma razão para isso, como vimos, foi que na época não havia simplesmente nenhuma alternativa à teoria reducionista da vida como máquina, a qual, para muitos biólogos, estava inteiramente fora de questão. Outra razão é que o vitalismo era fortemente apoiado por várias das ideologias então dominantes, inclusive a crença em um propósito cósmico (teleologia ou finalismo). Na Alemanha, Immanuel Kant teve uma influência forte sobre o vitalismo, em particular na escola do teleomecanicismo, influência ainda evidente nos escritos de Driesch. Uma ligação próxima com o finalismo é evidente no trabalho da maioria dos vitalistas.¹²

Em parte por causa de seu aprendizado teleológico, os vitalistas se opuseram veementemente ao selecionismo de Darwin. A teoria da evolução de Darwin negava a existência de qualquer teleologia cósmica, substituindo-a por um “mecanismo” para a mudança evolutiva — a seleção natural: “Vemos na descoberta de Darwin da seleção natural na luta pela sobrevivência a prova mais decisiva da validade exclusiva de causas que operam mecanicamente em todo o domínio da biologia, e vemos nisso a derrocada decisiva de todas as interpretações teleológicas e vitalistas dos organismos” (Haeckel, 1866). O selecionismo tornou o vitalismo supérfluo no reino da adaptação.

Driesch era um antidarwinista raivoso, como o eram outros vitalistas, mas seus argumentos contra a seleção natural eram sempre ridículos e mostravam claramente que ele não entendia

essa teoria. O darwinismo, ao fornecer um mecanismo para a evolução ao mesmo tempo em que negava qualquer visão finalista ou vitalista da vida, tornou-se o alicerce de um novo paradigma para explicar a “vida”.

O declínio do vitalismo

Quando o vitalismo foi proposto pela primeira vez e amplamente adotado, ele pareceu dar uma resposta razoável à palpitante questão: “O que é vida?”. Além disso, naquela época ele era uma alternativa teórica legítima não só ao mecanicismo bruto da Revolução Científica, mas também ao fisicalismo do século XIX. O vitalismo aparentemente explicava as manifestações da vida com muito mais sucesso do que a simplista teoria da máquina de seus oponentes.

Mesmo considerando quão dominante o vitalismo foi na biologia e quão longo foi o período no qual prevaleceu, é surpreendente ver quão rápida e completamente ele desmoronou. O último apoio ao vitalismo como concepção válida em biologia desapareceu por volta de 1930. Um número considerável de fatores diferentes contribuiu para sua queda.

Em primeiro lugar, o vitalismo era visto mais e mais como um conceito metafísico em vez de científico. Ele era considerado não-científico porque os vitalistas não tinham nenhum método para testá-lo. Ao afirmarem dogmaticamente a existência de uma força vital, os vitalistas freqüentemente impediam a busca de um reducionismo constitutivo que elucidasse as funções básicas dos organismos vivos.

Em segundo lugar, a crença de que os organismos eram constituídos de uma substância especial diferente da matéria inanimada perdeu apoio paulatinamente. Tal substância, como se acreditou durante a maior parte do século XIX, era o protoplasma, o material celular fora do núcleo¹³ que depois seria chamado de citoplasma

(um termo introduzido por Kölliker). Uma vez que o protoplasma parecia ter o que se chamava de propriedades “coloidais”, um próspero ramo da química se desenvolveu: a química coloidal. A bioquímica, no entanto, juntamente com a microscopia eletrônica, acabou por estabelecer a verdadeira composição do citoplasma e elucidou a verdadeira natureza de seus vários componentes: organelas celulares, membranas e macromoléculas. Descobriu-se, então, que a tal substância especial, o “protoplasma”, não existia, e o conceito desapareceu da literatura biológica. A natureza do estado coloidal também foi explicada bioquimicamente, e a química coloidal deixou de existir. Assim, todas as evidências de uma categoria separada para as substâncias vivas sumiram, e tornou-se possível explicar as propriedades aparentemente únicas da matéria viva em termos de macromoléculas e de sua organização. As macromoléculas, por sua vez, são compostas dos mesmos átomos e das mesmas pequenas moléculas que a matéria inanimada. A síntese da substância orgânica uréia em laboratório, realizada por Wöhler em 1828, foi a primeira prova da conversão artificial de compostos inorgânicos em uma molécula orgânica.

Em terceiro lugar, todas as tentativas dos vitalistas de demonstrar a existência de uma força vital não-material terminaram em fracasso. Uma vez que os processos fisiológicos e de desenvolvimento começaram a ser explicados em termos de processos físico-químicos no nível celular e molecular, essas explicações não deixaram nenhum resíduo inexplicado que requeresse uma interpretação vitalista. O vitalismo simplesmente se tornou supérfluo.

Em quarto lugar, foram desenvolvidos novos conceitos biológicos para explicar os fenômenos que costumavam ser citados como prova do vitalismo. Dois avanços em particular se revelaram cruciais para essa mudança. Um foi a ascensão da genética, que acabou levando ao conceito de programa genético. Isso tornou possível explicar todos os fenômenos vivos dirigidos, pelo menos

em princípio, como processos teleonômicos controlados por programas genéticos. Outro fenômeno aparentemente teleológico a ganhar uma interpretação nova foi a *Zweckmässigkeit* de Kant. Essa reinterpretação foi obtida pelo segundo avanço, o darwinismo. A seleção natural tornou a adaptação possível ao fazer uso da variabilidade abundante da natureza. Assim, dois grandes alicerces ideológicos do vitalismo — a teleologia e o anti-selecionismo — foram destruídos. A genética e o darwinismo tiveram sucesso em oferecer interpretações válidas para os fenômenos que os vitalistas alegavam ser inexplicáveis a menos que se invocasse uma substância ou força vital.

Se se acreditasse nos escritos dos fisicalistas, o vitalismo não teria sido nada senão um impedimento ao crescimento da biologia. O vitalismo, dizia-se, tirou os fenômenos da vida da esfera da ciência e os transferiu para a esfera da metafísica. Essa crítica é de fato válida para o trabalho de alguns dos vitalistas mais místicos, mas não é justa quando endereçada a cientistas de respeito como Blumenbach e, mais ainda, Müller, que especificamente articulou todos os aspectos da vida que os fisicalistas deixaram sem explicação. Que a explicação de Müller tenha sido falha não diminui o mérito de seu autor de ter esboçado os problemas que ainda precisavam ser resolvidos.

Há muitas situações na história da ciência nas quais esquemas explicativos inadequados foram adotados para um problema cuja visualização era clara porque os fundamentos da explicação real ainda não haviam sido colocados. A explicação de Kant para a evolução pela teleologia é um exemplo famoso. É provavelmente justificável concluir que o vitalismo foi um movimento necessário para demonstrar a vacuidade do fisicalismo raso na tentativa de explicar a vida. De fato, como François Jacob (1973) bem formulou, os vitalistas foram em grande parte responsáveis pelo reconhecimento da biologia como uma disciplina científica autônoma.

Antes de nos voltarmos para o paradigma organicista que substituiu tanto o vitalismo quando o fisicalismo, podemos registrar de passagem um fenômeno bastante peculiar no século xx — o desenvolvimento de crenças vitalistas entre os físicos. Niels Bohr foi aparentemente o primeiro a sugerir que leis especiais, que não eram encontradas na natureza inanimada, pudessem operar nos organismos. Pensava nessas leis como sendo análogas às da física, só que restritas a eles. Erwin Schrödinger e outros físicos apoiavam idéias semelhantes. Francis Crick (1966) dedicou um livro inteiro à refutação das idéias vitalistas dos físicos Walter Elsasser e Eugene Wigner. É curioso que uma forma de vitalismo tenha sobrevivido na mente de alguns físicos respeitáveis muito tempo depois de essa corrente de pensamento ter sido extinta da mente de biólogos respeitáveis.

Uma outra ironia, no entanto, é que muitos biólogos no período após 1925 acreditaram que princípios da física recém-descobertos, como a teoria da relatividade, o princípio da complementaridade de Bohr, a mecânica quântica e o princípio da incerteza de Heisenberg, forneceriam um vislumbre novo aos processos biológicos. De fato, até onde posso julgar, nenhum desses princípios se aplica à biologia. Apesar de Bohr ter buscado nela evidências para a complementaridade e ter tentado algumas analogias desesperadas para estabelecê-las, tal princípio não existe na biologia. A incerteza de Heisenberg é algo muito diferente de qualquer tipo de indeterminação encontrado na biologia.

O vitalismo foi ainda mais longo nos escritos dos filósofos que nos trabalhos dos físicos. Mas, que eu saiba, não há vitalistas no grupo de filósofos da biologia que começou a publicar seus trabalhos depois de 1965. Tampouco conheço algum biólogo de respeito que ainda apóie o vitalismo diretamente. Os poucos biólogos do fim do século xx que ainda tinham alguma inclinação vitalista (A. Hardy, S. Wright, A. Portmann) não estão mais vivos.

Por volta de 1920, o vitalismo parecia estar já desacreditado. O fisiologista J. S. Haldane (1931) afirmou corretamente que “os biólogos foram quase unânimes em abandonar o vitalismo como crença reconhecida”. Ao mesmo tempo, ele também disse que uma explicação puramente mecanicista não é capaz de dar conta da coordenação que é tão característica da vida. O que deixava Haldane particularmente intrigado era a seqüência ordenada de eventos durante o desenvolvimento. Depois de ter mostrado que tanto a abordagem vitalista quanto a mecanicista eram inválidas, ele declarou que “devemos encontrar uma base teórica diferente para a biologia, baseada na observação de que todos os fenômenos nela envolvidos tendem a ser tão coordenados que expressam o que é normal para um organismo adulto”.

A derrocada do vitalismo, em vez de levar à vitória do mecanicismo, resultou em um novo sistema explicativo. Esse novo paradigma aceitava que os processos no nível molecular poderiam ser explicados exaustivamente por mecanismos físico-químicos, mas que esses mecanismos desempenhavam um papel cada vez menor, se não desprezível, em níveis de integração mais altos. Eles são substituídos pelas características emergentes dos sistemas organizados. As características únicas dos organismos vivos não se devem à sua composição, e sim à sua organização. Esse modo de pensar é hoje comumente chamado de *organicismo*. Ele enfatiza em particular as características de sistemas ordenados altamente complexos e a natureza histórica dos programas genéticos que evoluíram nos organismos.

De acordo com W. E. Ritter, que cunhou o termo organicismo em 1919,¹⁴ “os todos são tão relacionados com as suas partes que não só a existência do todo depende da ordenada cooperação e interdependência de suas partes, mas também o todo exerce uma

medida de controle determinante sobre suas partes” (Ritter e Bailey, 1928). J. C. Smuts (1926) explicou sua própria visão holística dos organismos da seguinte forma: “Um todo, de acordo com a visão aqui apresentada, não é simples, mas composto, e constitui-se de partes. Os todos naturais, como os organismos, são [...] complexos ou compostos, consistindo em muitas partes em relação ativa e interação de um tipo ou outro, e as partes podem ser elas mesmas todos menores, como células em um organismo”. Seus enunciados foram condensados mais tarde por outros biólogos na frase concisa: “O todo é mais do que a soma de suas partes”.¹⁵

Desde 1920, os termos holismo e organicismo têm sido usados como sinônimos. Talvez holismo tenha sido usado mais freqüentemente a princípio, e o adjetivo “holístico” é ainda útil hoje. Mas holismo não é um termo estritamente biológico, uma vez que muitos sistemas inanimados também são holísticos, como corretamente apontou Niels Bohr. Portanto, em biologia, o termo mais restritivo “organicismo” é hoje usado com mais freqüência. Ele inclui o reconhecimento de que a existência de um programa genético é uma característica importante do novo paradigma.

A objeção dos organicistas não era tanto aos aspectos mecanicistas do fisicalismo, mas a seu reducionismo. Os fisicalistas chamavam suas explicações de explicações mecanicistas, o que elas eram realmente, mas o que as caracterizava era o fato de serem explicações reducionistas. Para os reducionistas, o problema da explicação é em princípio resolvido assim que a redução aos menores componentes é atingida. Eles afirmam que tão logo se complete o inventário desses componentes e se determinem as funções de cada um deles, deve ser fácil explicar também tudo que é observado nos níveis mais altos de organização.

Os organicistas demonstraram que essa afirmação simplesmente não é verdadeira, porque o reducionismo explicativo é incapaz de explicar as características dos organismos que emergem em

níveis mais altos de organização. Curiosamente, até a maioria dos mecanicistas admitia a insuficiência de uma abordagem puramente reducionista. O filósofo Ernest Nagel (1961), por exemplo, admitiu que “há amplos setores do estudo biológico nos quais explicações físico-químicas não têm papel algum no presente momento, e que um grande número de teorias biológicas que não são físico-químicas em seu caráter tem sido explorado com sucesso”. Nagel tentou salvar o reducionismo inserindo as palavras “no presente momento”, mas já era evidente que conceitos puramente biológicos como território, exibição, evasão de predadores e outros não poderiam nunca ser reduzidos aos termos da física e da química sem perder inteiramente seu significado biológico.¹⁶

Os pioneiros do holismo (por exemplo, E. S. Russell e J. S. Haldane) argumentaram de forma eficaz contra a abordagem reducionista e descreveram de forma convincente quão bem a abordagem holística se encaixa nos fenômenos do comportamento e do desenvolvimento. Mas eles não conseguiram explicar a verdadeira natureza dos fenômenos holísticos. Não tiveram sucesso ao tentar explicar a natureza do “todo” ou a integração das partes em um todo. Ritter, Smuts e outros proponentes do holismo eram igualmente vagos (e algo metafísicos) nas suas explicações. De fato, algumas das formulações de Smuts tinham um sabor bastante teleológico.¹⁷

Alex Novikoff (1947), no entanto, exprimiu com um detalhamento considerável por que uma explicação dos organismos vivos tem de ser holística. “O que são todos em um nível se tornam partes em outro [...] tanto as partes quanto os todos são entidades materiais, e a integração resulta da interação entre partes como consequência das suas propriedades.” Uma vez que o holismo rejeita a redução, ele “não enxerga os organismos vivos como máquinas feitas de uma miríade de partes discretas (unidades físico-químicas), removíveis como os pistões de um motor e passíveis de serem descritas independentemente do sistema de onde são removidas”. Devido à interação

entre as partes, uma descrição destas isoladamente não consegue comunicar as propriedades do sistema como um todo. É a organização destas partes que controla o sistema inteiro.

Há uma integração das partes a cada nível, desde a célula até os tecidos, órgãos, sistemas de órgãos e organismos inteiros. Essa integração é encontrada no nível bioquímico, no nível de desenvolvimento e, em organismos completos, também no nível comportamental.¹⁸ Todos os holistas concordam que nenhum sistema pode ser explicado de forma completa por meio das propriedades de seus componentes isolados. A base do organicismo é o fato de que os seres vivos possuem uma organização. Eles não são apenas montes de características ou de moléculas, uma vez que sua função depende inteiramente de sua organização, de suas inter-relações, interações e interdependências.

Emergência

Está claro agora que dois dos grandes pilares do quadro explicativo da biologia moderna estavam faltando em todas as apresentações iniciais do holismo. Um deles, o conceito de programa genético, estava faltando porque ainda não havia sido desenvolvido. O outro pilar faltante era o conceito de emergência — segundo o qual, em um sistema estruturado, novas propriedades emergem em níveis mais altos de integração que não poderiam ser previstas a partir do conhecimento dos componentes em níveis inferiores. Esse conceito estava ausente porque ou não havia sido ainda imaginado, ou o foi para em seguida ser descartado como não-científico e metafísico. Ao incorporar por fim os conceitos de programa genético e de emergência, o organicismo se tornou anti-reducionista, mas ainda assim se manteve mecanicista.

Jacob (1973) descreve a emergência da seguinte forma: “Em cada nível, unidades de tamanho relativamente bem definido e de

estrutura quase idêntica se associam para formar uma unidade do nível acima. Cada uma dessas unidades formadas pela integração de subunidades pode receber a designação geral de 'íntegron'. Um íntegron é formado pela organização de íntegrans no nível abaixo dele; ele participa da construção do íntegron no nível acima dele". Cada íntegron tem novas características e capacidades, que não estavam presentes em nenhum nível mais baixo de integração; dessas características e capacidades diz-se que elas emergiram.¹⁹

O conceito de emergência ganhou seu primeiro destaque no livro de Lloyd Morgan sobre evolução emergente (1923). Os darwinistas que adotaram a evolução emergente, no entanto, tinham restrições a ela porque a consideravam antigradualista. De fato, alguns emergencistas iniciais eram também saltacionistas, particularmente durante o período do mendelismo; ou seja, eles acreditavam que a evolução ocorria em saltos grandes e descontínuos, ou saltações. Essas restrições hoje estão superadas, porque se compreende que a população (ou espécie), e não o gene ou o indivíduo, é a unidade da evolução; é possível ter diferentes formas (descontinuidades fenéticas) dentro de uma população — por meio da recombinação do DNA existente —, ao passo que uma população como um todo deve necessariamente evoluir de forma gradual. Um evolucionista moderno diria que a formação de um sistema mais complexo, que representa a emergência de um novo nível mais elevado, é estritamente uma questão de variação genética e seleção. Os íntegrans evoluem através da seleção natural, e em cada nível eles são sistemas adaptados, porque contribuem para a aptidão de um indivíduo. Isso não conflita de forma alguma com os princípios do darwinismo.

Em resumo, o organicismo tem sido caracterizado pela crença dual na importância de se considerar o organismo como um todo e, ao mesmo tempo, a firme convicção de que essa totalidade não deve ser tomada como algo misteriosamente fechado à análise, e

sim como algo que deve ser analisado e estudado, escolhendo-se o nível certo para tanto. O organicista não rejeita a análise, mas insiste no fato de que esta deve continuar para baixo somente até o menor nível no qual essa abordagem fornece novas informações relevantes e novos vislumbres. Cada sistema, cada íntegron, perde algumas de suas características quando dissociado, e muitas das interações entre componentes de um organismo não ocorrem no nível físico-químico, e sim em um nível mais alto de integração. E, por fim, é o programa genético que controla o desenvolvimento e as atividades dos íntegrans orgânicos que emergem em cada nível sucessivamente mais alto de integração.

AS CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DA VIDA

Hoje, quer se consultem biólogos de campo, quer se consultem filósofos da ciência, parece haver um consenso a respeito da natureza dos organismos vivos. No nível molecular, todas as suas funções — e, no nível celular, a maior parte delas — obedecem às leis da física e da química. Não existe nenhum resíduo que demande princípios vitalistas autônomos. Ainda assim, os organismos são fundamentalmente diferentes da matéria inanimada. Eles são sistemas ordenados hierarquicamente, com muitas propriedades emergentes que jamais são encontradas na matéria inanimada; e, o mais importante, suas atividades são governadas por programas genéticos que contêm informação adquirida ao longo da história, de novo algo ausente na matéria inanimada.

Como resultado, os organismos vivos representam uma forma notável de dualismo. Não se trata aqui de dualismo entre corpo e alma, ou corpo e mente, ou seja, um dualismo em parte físico e em parte metafísico. O dualismo da biologia moderna é sempre físico-químico e deriva do fato de que os organismos pos-

suem tanto um genótipo quanto um fenótipo. O genótipo, que consiste em ácidos nucleicos, requer, para ser entendido, explicações evolutivas. O fenótipo, construído a partir da informação fornecida pelo genótipo e que consiste em proteínas, lipídios e outras macromoléculas, demanda explicações funcionais (próximas) para que se lhe entenda. Tal dualidade é desconhecida no mundo inanimado. As explicações do genótipo e do fenótipo requerem tipos diferentes de teoria.

Podemos tabular alguns dos fenômenos que são específicos dos seres vivos:

Programas que evoluem. Os organismos são produto de 3,8 bilhões de anos de evolução. Todas as suas características refletem essa história. O desenvolvimento, o comportamento e todas as outras atividades dos organismos vivos são em parte controlados por programas genéticos (e somáticos), que por sua vez resultam da informação genética acumulada através da história da vida. Historicamente, há uma continuidade desde a origem da vida e os mais simples procariontes até as árvores gigantes, os elefantes, as baleias e os seres humanos.

Propriedades químicas. Embora em última instância os organismos vivos se constituam dos mesmos átomos que a matéria inanimada, os tipos de moléculas responsáveis pelo seu desenvolvimento e por suas funções — ácidos nucleicos, peptídeos, enzimas, hormônios e componentes das membranas — são macromoléculas não encontradas na natureza inanimada. A química orgânica e a bioquímica mostraram que todas as substâncias encontradas nos organismos vivos podem ser quebradas em moléculas inorgânicas mais simples e podem, ao menos teoricamente, ser sintetizadas em laboratório.

Mecanismos regulatórios. Os sistemas vivos são caracterizados por todo tipo de controle e de mecanismos regulatórios, incluindo vários mecanismos de retroalimentação, que mantêm o estado de

equilíbrio do sistema. Mecanismos desse tipo jamais são encontrados na natureza inanimada.

Organização. Os organismos vivos são sistemas ordenados e complexos. Isso explica sua capacidade de regulação e de controle da interação do genótipo, bem como seus limites evolutivos e de desenvolvimento.

Sistemas teleonômicos. Os organismos vivos são sistemas adaptados, resultantes de inúmeras gerações prévias submetidas à seleção natural. Esses sistemas são programados para atividades teleonômicas (orientadas para um objetivo) desde o desenvolvimento embrionário até as atividades fisiológicas e comportamentais dos adultos.

Ordem limitada de magnitude. O tamanho dos organismos vivos ocupa uma extensão limitada do mundo médio, desde os menores vírus até as maiores baleias e árvores. As unidades básicas da organização biológica, as células e os componentes celulares, são muito pequenas, o que dá aos organismos uma grande flexibilidade evolutiva e de desenvolvimento.

Ciclo de vida. Os organismos, ao menos aqueles que se reproduzem sexualmente, passam por um ciclo definido, começando com um zigoto (óvulo fertilizado) e passando por vários estágios embrionários ou larvais até atingir a idade adulta. As complexidades do ciclo de vida variam de uma espécie para outra, incluindo em algumas espécies uma alternância de gerações sexual e assexual.

Sistemas abertos. Os organismos vivos obtêm continuamente energia e material do ambiente externo, e nele eliminam os dejetos do metabolismo. Sendo sistemas abertos, não estão sujeitos à segunda lei da termodinâmica.*

* A segunda lei da termodinâmica, que versa sobre a direção que um processo natural pode tomar, postula que a entropia (que pode ser entendida como “desordem”) de um sistema fechado aumenta com o tempo. (N. T.)

Essas propriedades dos organismos vivos lhes conferem um grande número de capacidades ausentes nos sistemas inanimados:

A capacidade de evoluir

A capacidade de se auto-replicar

A capacidade de crescer e se diferenciar por meio de um programa genético

A capacidade de ter metabolismo (de adquirir e liberar energia)

A capacidade de se auto-regular, para manter o sistema complexo em um estado de equilíbrio (homeostase, retroalimentação)

A capacidade (através da percepção e dos órgãos dos sentidos) de responder a estímulos do ambiente

A capacidade de mudar em dois níveis, o do fenótipo e o do genótipo.

Todas essas características dos organismos vivos os distinguem categoricamente dos sistemas inanimados. O reconhecimento gradual dessa singularidade do mundo vivo resultou no ramo da ciência chamado biologia, e levou ao reconhecimento da autonomia dessa ciência, como veremos no capítulo 2.

2. O que é ciência?

A biologia compreende todas as disciplinas dedicadas ao estudo dos organismos vivos. Algumas vezes essas disciplinas são chamadas de ciências da vida — um termo útil, que distingue a biologia das ciências físicas, cujo foco é o mundo inanimado. As ciências sociais, a ciência política, a ciência militar e muitas outras compreendem outros corpos sistematizados de conhecimento, e além dessas especialidades acadêmicas ainda encontramos às vezes coisas como a ciência marxista, a ciência ocidental, a ciência feminista, e mesmo supostas ciências, a exemplo da ciência cristã ou da ciência criacionista. Por que todas essas disciplinas se intitulam “ciências”? Que características tem a verdadeira ciência, que a distinguem de outros sistemas de pensamento? A biologia possui essas características?

É de imaginar que deveria ser fácil responder a essas perguntas. Por acaso todo mundo não sabe o que é ciência? Que esse não é o caso fica evidente quando se estuda não só a imprensa popular, mas também a imensa literatura profissional que lida com tal questão.¹ T. H. Huxley, amigo de Charles Darwin e popularizador das teorias dele, definiu a ciência como “nada senão o senso

comum treinado e organizado”. Infelizmente, isso não é verdade. Por exemplo, o senso comum nos diz que a Terra é chata e que o Sol gira em torno dela. Em cada ramo da ciência tem havido opiniões do senso comum que se provaram erradas mais tarde. É possível até chegar ao extremo de dizer que a atividade científica consiste em confirmar ou refutar o senso comum.

As dificuldades que os filósofos encontram para chegar a um consenso sobre a definição de ciência podem ser atribuídas a vários fatores. Um deles é o fato de que a ciência é tanto uma atividade (aquilo que os cientistas fazem) quanto um corpo de conhecimento (aquilo que os cientistas sabem). A maioria dos filósofos hoje, em sua definição de ciência, enfatiza a atividade contínua dos cientistas: exploração, explicação e teste. Mas outros filósofos tendem a definir ciência como um corpo crescente de conhecimento, “a organização e a classificação do conhecimento com base em princípios explicativos”.²

A ênfase na aquisição de dados e no acúmulo de conhecimento é um resquício dos primórdios da Revolução Científica, quando a indução era o método preferido da ciência. Havia entre os inducionistas um equívoco generalizado de que uma pilha de fatos não só permitiria generalizações como também, quase automaticamente, produziria novas teorias, como se por combustão espontânea. Na verdade, os filósofos hoje geralmente concordam que os fatos por si mesmos não explicam nada, e eles chegam a debater um bocado sobre se fatos puros chegam a existir. “Não são todas as observações calcadas em uma teoria?”, perguntam. Mesmo essa não é uma preocupação nova. Em 1861, Charles Darwin escreveu: “Que curioso é que alguém possa deixar de ver que toda observação deve ser a favor ou contra determinada visão, se quiser ter alguma utilidade”.

É claro que a maioria dos autores que usam a palavra “conhecimento” pretende através dela incluir não somente fatos mas tam-

bém a interpretação dos fatos; é menos confuso, no entanto, usar a palavra “compreensão” com esse sentido. Daí a definição: “O objetivo da ciência é fazer avançar a nossa compreensão da natureza”. Alguns filósofos acrescentariam a frase “por meio da resolução de problemas científicos”.³ Alguns foram ainda mais longe e disseram: “Os objetivos da ciência são compreender, prever e controlar”. No entanto, há muitos ramos da ciência nos quais a previsão desempenha um papel bastante subordinado, e em muitas ciências não-aplicadas a questão do controle nunca chega a se colocar.

Outra razão para as dificuldades que os filósofos têm tido para concordar a respeito de uma definição de ciência é que o conjunto de esforços que chamamos de ciência tem mudado continuamente através dos séculos. Por exemplo, a teologia natural — o estudo da natureza com o propósito de entender as intenções de Deus — era considerada um ramo legítimo da ciência até cerca de 150 anos atrás. Como resultado, em 1859 alguns dos críticos de Darwin o admoestaram por ter incluído em seu relato da origem das espécies um fator “não-científico” como o acaso, ignorando aquilo que eles viam claramente como a mão de Deus no planejamento [design] de todas as criaturas, grandes e pequenas. No entanto, no século xx, testemunhamos uma reversão completa na visão que os cientistas têm dos fenômenos aleatórios: tanto nas ciências da vida quanto nas ciências físicas, houve uma mudança de uma noção estritamente determinista de como o mundo natural funciona para uma concepção de que ele é em grande parte probabilístico.

Para citar outro exemplo de como a ciência muda gradualmente, o forte empirismo da Revolução Científica levou a uma ênfase na descoberta de fatos novos, ao mesmo tempo em que, curiosamente, se dava pouca atenção à importância que o desenvolvimento de novos conceitos tem no avanço da ciência. Hoje, conceitos como competição, origem comum, território e altruísmo são tão significativos na biologia quanto são as leis e descobertas nas

ciências físicas, e assim mesmo sua importância foi estranhamente ignorada até bem recentemente. Essa negligência se reflete, por exemplo, nas categorias estabelecidas para os prêmios Nobel. Mesmo se houvesse um prêmio Nobel para a biologia (o que não é o caso), Darwin não poderia ter sido premiado pelo desenvolvimento do conceito de seleção natural — certamente o maior feito científico do século XIX — porque a seleção natural não foi uma descoberta. Essa atitude que favorece descobertas em detrimento de conceitos continua até os dias de hoje, mas em menor grau do que nos tempos de Darwin.

Ninguém sabe que outras mudanças na nossa imagem de ciência o futuro poderá trazer. O melhor que se pode fazer, dadas as circunstâncias, é tentar apresentar um sumário do tipo de ciência que domina em nosso tempo, o final do século XX.

AS ORIGENS DA CIÊNCIA MODERNA

A ciência moderna começou com a Revolução Científica, esse notável feito do intelecto humano tão bem caracterizado pelos nomes Copérnico, Galileu, Kepler, Newton, Descartes e Leibniz. Naquela época foram desenvolvidos muitos dos princípios básicos do método científico, que em grande parte caracterizam a ciência ainda hoje. O que se considera como ciência é, logicamente, uma questão de opinião. Em alguns aspectos a biologia de Aristóteles também era uma ciência, mas a ela faltavam o rigor metodológico e a completude da ciência da biologia da forma como ela se desenvolveria dos anos 1830 aos 1860.

As disciplinas científicas que deram origem ao conceito dominante de ciência durante a Revolução Científica foram a matemática, a mecânica e a astronomia. O tamanho da contribuição da lógica escolástica ao arcabouço original da ciência fisicalista

ainda não foi totalmente determinado; mas ela certamente teve um papel importante no pensamento de Descartes. Os ideais dessa ciência nova e racional eram a objetividade, o empirismo, o indutivismo e o esforço para eliminar todo e qualquer resquício de metafísica — ou seja, explicações mágicas ou supersticiosas de fenômenos, que não se apoiavam no mundo físico.

No entanto, virtualmente todos os arquitetos da Revolução Científica permaneceram cristãos devotos; e, como era de esperar, o tipo de ciência que eles criaram era em grande medida um ramo da fé cristã. Segundo essa visão, o mundo fora criado por Deus e não poderia ser caótico. Ele era governado por Suas leis, que, por serem divinas, eram universais. Uma explicação qualquer de um fenômeno ou processo era considerada adequada se estivesse de acordo com uma dessas leis. Assim, com o mecanismo de funcionamento do cosmos tão claro e absoluto, deveria ser possível provar e prever qualquer coisa. A tarefa da ciência de Deus, portanto, era achar essas leis universais, encontrar a verdade última de tudo o que existe seguindo o enunciado dessas leis e testar sua veracidade por meio de previsões e experimentos.

No que dizia respeito à mecânica, as coisas se enquadravam bastante bem nesse ideal. Os planetas orbitavam o Sol, e esferas desciam planos inclinados de forma previsível. Talvez não se deva a um acidente da história o fato de que a mecânica, sendo a mais simples das ciências, tenha sido a primeira a desenvolver um conjunto coerente de leis e métodos. Mas, à medida que outros ramos das ciências físicas se desenvolviam, exceções à universalidade e às determinações da mecânica eram encontradas, demandando várias modificações. Com efeito, na vida cotidiana as leis da mecânica são frequentemente tão obscurecidas por processos randômicos (estocásticos) que a determinação parece estar totalmente ausente. Por exemplo, o movimento de massas de ar e de água é em geral acompanhado de tanta turbulência que as leis da mecânica

não permitem previsões de longo prazo nem em meteorologia nem em oceanografia.

A receita de mundo natural dos mecanicistas funcionava menos ainda no caso das ciências biológicas. Não havia lugar no método científico dos mecanicistas para a reconstrução de seqüências históricas, como as que ocorreram durante a evolução da vida, nem para a pluralidade de respostas e causas que tornam a previsão do futuro impossível nas ciências biológicas. Quando a biologia evolutiva era testada em sua “cientificidade” pelos critérios da mecânica, ela era reprovada.

Isso era particularmente verdadeiro quando se tratava do método de investigação favorito da mecânica: a experimentação. O experimento era tão valorizado nesse campo que chegou a ser tratado como se fosse o *único* método científico válido. Qualquer outro método era considerado ciência inferior. Mas, uma vez que não era de bom-tom chamar os outros colegas de maus cientistas, essas outras ciências, não-experimentais, passaram a ser chamadas de ciências descritivas. Esse termo foi, durante séculos, apensado às ciências da vida de forma pejorativa.

Na verdade, nosso conhecimento básico em *todas* as ciências é apoiado em descrições. Quanto mais jovem é a ciência, mais descritiva ela precisa ser a fim de lançar seus alicerces factuais. Mesmo hoje, a maioria das publicações em biologia molecular é essencialmente descritiva. O que realmente se quer dizer com “descritiva” é “observacional”, pois toda descrição é baseada em observação, seja a olho nu ou pelos órgãos dos sentidos, seja por simples microscópios ou telescópios ou, ainda, por meio de instrumentação científica altamente sofisticada. Mesmo durante a Revolução Científica, a observação (mais do que a experimentação) teve um papel decisivo no avanço da ciência. As generalizações cosmológicas de Copérnico, Kepler e, em sua maior parte, de Newton foram baseadas em observação em vez de experimentos de laboratório. Hoje,

as teorias subjacentes a campos como a astronomia, a astrofísica, a cosmologia, a ciência planetária e a geologia mudam com frequência, como resultado de novas observações que têm pouco ou nada a ver com experimentos.

É possível colocar as coisas de outro jeito e dizer que as descobertas descritas por Galileu e seus seguidores vieram de experimentos da natureza que eles conseguiram observar. Os eclipses e as ocultações de planetas e de estrelas são experimentos naturais, bem como os terremotos, as erupções vulcânicas, as crateras de meteoros, as reversões no magnetismo da Terra e os eventos de erosão. Na biologia evolutiva, a união das Américas do Norte e do Sul durante o Plioceno através do istmo do Panamá, que resultou em um intercâmbio maciço de fauna entre os dois continentes, é um desses experimentos; a colonização de ilhas vulcânicas e de arquipélagos como Krakatoa, Galápagos e as ilhas havaianas, sem mencionar a desfaunização e a subsequente recolonização de boa parte do hemisfério Norte devido às glaciações do Pleistoceno, são outros experimentos naturais. Muito progresso nas ciências observacionais se deve ao gênio daqueles que descobriram, avaliaram criticamente e compararam tais experimentos naturais em campos nos quais um experimento de laboratório é altamente impraticável, se não impossível.

Apesar de ter representado uma revolução no pensamento — por ter abandonado a superstição, a magia e os dogmas da teologia medieval —, a Revolução Científica nunca incluiu uma revolta contra a lealdade à religião cristã, e esse viés ideológico teve conseqüências adversas para a biologia. A resposta aos problemas mais básicos do estudo dos organismos vivos depende de se invocar ou não a mão de Deus. Isso é particularmente verdade no que tange a todas as questões sobre a origem (o assunto de interesse dos criacionistas) e o planejamento (o assunto de interesse dos teólogos naturais). A aceitação de um universo que não continha nada além de Deus,

almas humanas, matéria e movimento funcionava bem para as ciências físicas da época, mas trabalhava contra o avanço da biologia.⁴

Como resultado, a biologia esteve basicamente dormente até os séculos XIX e XX. Embora uma quantidade razoável de conhecimento factual tenha se acumulado durante os séculos XVII e XVIII em história natural, anatomia e fisiologia, o mundo da vida naquela época era considerado parte dos domínios da medicina; isso valia para a anatomia e a fisiologia, e mesmo para a botânica, que consistia em grande parte na identificação de plantas de importância medicinal. Claro, havia alguma história natural, mas esta era ou praticada como hobby ou colocada a serviço da teologia natural. Em retrospecto, é evidente que alguma coisa dessa história natural era muito boa ciência; mas, não tendo sido reconhecida como tal à época, não contribuiu para a filosofia da ciência.

Finalmente, a aceitação da mecânica como o modelo ideal de ciência levou à crença de que os organismos não são diferentes da matéria inerte. Daí se seguia logicamente a conclusão de que o objetivo da ciência era reduzir a biologia às leis da física e da química. No tempo devido, os avanços na biologia tornaram essa posição indefensável (ver o capítulo 1). A derrocada final do mecanicismo e de sua nêmetese, o vitalismo, e a aceitação, no século XX, do paradigma do organicismo tiveram um impacto profundo sobre a posição da biologia entre as ciências — um impacto ainda não totalmente apreciado por muitos filósofos da ciência.

A BIOLOGIA É UMA CIÊNCIA AUTÔNOMA?

Após meados do século XX, é possível distinguir três visões muito diferentes sobre a posição que a biologia ocupa entre as ciências. De acordo com um extremo, a biologia deve ser totalmente excluída da ciência porque nela faltam a universalidade, a estrutura

baseada em leis e a natureza estritamente quantitativa de uma “ciência verdadeira” (ou seja, a física). Segundo o outro extremo, a biologia não só tem todos os atributos necessários de uma ciência genuína como também difere da física em aspectos importantes, de modo que deve ser considerada uma ciência autônoma, equivalente à física. Entre esses dois extremos está a visão de que a biologia deveria receber o status de ciência “provinciana”, porque lhe falta universalidade e porque seus achados podem em última instância ser reduzidos às leis da física e da química.

A pergunta “A biologia é uma ciência autônoma?” pode ser reformulada em duas partes: “É a biologia, como a física e a química, uma ciência?” e “É a biologia uma ciência exatamente como a física e a química?”. Para responder à primeira pergunta, poderíamos consultar os oito critérios de John Moore para determinar se uma atividade qualquer se qualifica como ciência. De acordo com Moore (1993): (1) Uma ciência deve se basear em dados coletados no campo ou em observações de laboratório ou em experimentos, sem invocar fatores sobrenaturais. (2) Os dados precisam ser coletados para responder a perguntas, e as observações devem ser feitas para fortalecer ou refutar conjecturas. (3) Devem ser empregados métodos objetivos, de modo a minimizar qualquer eventual viés. (4) As hipóteses devem ser consistentes com as observações e compatíveis com o arcabouço teórico geral. (5) Todas as hipóteses devem ser testadas e, se possível, hipóteses concorrentes devem ser desenvolvidas, e seu grau de validade (capacidade de resolver problemas) deve ser comparado. (6) Generalizações devem ser universalmente válidas no domínio particular dessa ciência. Eventos singulares devem ser explicáveis sem invocar fatores sobrenaturais. (7) De forma a eliminar a possibilidade de erro, um fato ou descoberta deve ser totalmente aceito apenas se (repetidamente) confirmado por outros pesquisadores. (8) A ciência é caracterizada pelo aprimoramento contínuo das teorias científicas, pela

substituição de teorias falhas ou incompletas e pela solução de problemas antes intrigantes.

A julgar por esses critérios, a maioria das pessoas poderia concluir que a biologia deveria ser considerada uma ciência legítima, assim como a física e a química. Mas seria a biologia uma ciência provinciana, não estando portanto no mesmo patamar que as ciências físicas? Quando o termo “ciência provinciana” foi introduzido, ele era usado como antônimo de “universal”, significando que a biologia lidava com objetos específicos e localizados, sobre os quais não era possível propor leis universais. As leis da física, dizia-se, não têm limitações de tempo ou espaço; elas são válidas igualmente na galáxia de Andrômeda e na Terra. A biologia, em contraste, é provinciana porque toda vida que conhecemos só existe na Terra, e há apenas 3,8 bilhões de anos, dos mais de 10 bilhões transcorridos desde o Big Bang.

Esse argumento foi refutado de maneira consistente por Ronald Munson (1975), que mostrou que nenhuma das leis, teorias ou princípios fundamentais da biologia é implícita ou explicitamente restrita em seu escopo ou leque de aplicação a determinada região do espaço ou do tempo. Há um bocado de singularidade no mundo da vida, mas é possível tecer toda sorte de generalizações sobre fenômenos singulares. Cada corrente oceânica também é única, mas podemos estabelecer leis e teorias sobre as correntes oceânicas. Em relação ao argumento de que a restrição da vida conhecida à Terra rouba toda universalidade aos princípios biológicos, aqui devemos perguntar: “O que é universal?”. Uma vez que se sabe que existe matéria inanimada fora da Terra, qualquer ciência que lide com a matéria inanimada deve ser aplicável em outros planetas de forma a ser universal. A vida, até agora, só foi demonstrada na Terra; ainda assim, suas leis e seus princípios (como aqueles que regem a matéria inanimada) são universais, porque valem na Terra, o domínio conhecido de sua existência. Não con-

sigo ver nenhuma razão para não usar a designação “universal” em um princípio que é verdadeiro na totalidade do domínio onde ele é aplicável.

Mais frequentemente, quando a biologia é descrita como uma ciência “provinciana”, o que de fato se quer dizer é que ela é um subgrupo da física e da química, de forma que, em última análise, suas descobertas possam ser reduzidas a teorias físicas e químicas. Por outro lado, um defensor da autonomia da biologia pode argumentar da seguinte maneira: muitos atributos dos organismos vivos que interessam aos biólogos não podem ser reduzidos às leis físico-químicas e, além disso, muitos aspectos do mundo físico estudados pelos físicos não são relevantes para o estudo da vida (ou para qualquer outra ciência que não seja a física). Nesse sentido, a física é uma ciência tão provinciana quanto a biologia. Não existe razão para considerar a física como modelo só porque ela foi a primeira ciência bem organizada. Esse fato histórico não a torna mais universal que sua irmã mais nova, a biologia. Uma unidade das ciências não pode ser obtida enquanto não se aceitar que a ciência contém uma grande quantidade de províncias separadas, uma das quais é a física, outra a biologia. Seria fútil tentar “reduzir” a biologia, uma ciência provinciana, à física, outra ciência provinciana, ou vice-versa.⁵

Muitos dos promotores, se não todos, do movimento da unidade das ciências no século XIX e no começo do século XX eram filósofos, e não cientistas, e eles tinham pouca consciência da heterogeneidade das ciências. Isso se aplica às ciências físicas — que incluem a física de partículas elementares, a física do estado sólido, a mecânica quântica, a mecânica clássica, a teoria da relatividade e o eletromagnetismo, sem falar na geofísica, na astrofísica, na oceanografia, na geologia e outras — e cresce exponencialmente quando pensamos em muitas das ciências da vida. A impossibilidade de reduzir todos esses domínios a um único denominador comum tem sido demonstrada repetidas vezes ao longo dos últimos setenta anos.

Então, reiterando: sim, a biologia, como a física e a química, é uma ciência. Mas a biologia não é uma ciência como a física e a química; ela é uma ciência autônoma, no mesmo nível que as igualmente autônomas ciências físicas. Não obstante, não seria possível falar de ciência no singular se todas as ciências, apesar de suas características singulares e de certo grau de autonomia, não compartilhassem características comuns. Uma das tarefas do filósofo da biologia é estabelecer quais são as características que ela compartilha com as outras ciências, não só em metodologia mas também em princípios e conceitos. E esses traços comuns definiriam uma ciência unificada.

DO QUE SE OCUPA A CIÊNCIA

Tem sido dito que o cientista busca a verdade, mas muitas pessoas que não são cientistas falam a mesma coisa. O mundo e tudo o que existe nele interessa não só aos cientistas mas também aos teólogos, aos filósofos, poetas e políticos. Como se pode demarcar os interesses dessas pessoas e os do cientista?

Como a ciência difere da teologia

A demarcação entre a ciência e a teologia talvez seja a mais fácil, porque os cientistas não invocam o sobrenatural para explicar como o mundo natural funciona, tampouco se fiam em revelações divinas para entendê-lo. Quando os humanos primitivos tentavam dar explicações para fenômenos naturais, sobretudo para desastres, eles invariavelmente invocavam seres e forças sobrenaturais, e mesmo hoje a revelação divina é, para muitos cristãos devotos, uma fonte tão legítima de conhecimento da verdade quanto a ciência. Quase todos os cientistas que conheço têm reli-

gião, no melhor sentido da palavra, mas nenhum deles invoca causas sobrenaturais ou revelação divina.

Outra característica que distingue a ciência da teologia é seu grau de abertura. As religiões são caracterizadas por sua relativa inviolabilidade; nas religiões reveladas, uma diferença de interpretação de uma única palavra no documento fundador revelado pode dar origem a uma nova religião. Isso contrasta dramaticamente com a situação de qualquer campo ativo da ciência, na qual se encontram versões diferentes de quase qualquer teoria. Novas conjecturas são feitas continuamente, conjecturas anteriores são refutadas e em todos os momentos existe uma considerável diversidade intelectual. Com efeito, é por um processo darwinista de variação e seleção na formação e teste de hipóteses que a ciência avança (ver o capítulo 5).

Apesar dessa abertura da ciência para fatos e hipóteses novos, deve-se dizer que quase todos os cientistas — um pouco como os teólogos — trazem consigo um conjunto do que poderíamos chamar de “princípios iniciais” para estudar o mundo. Um dos axiomas que se assumem é o de que *existe* um mundo real, independente das percepções humanas. Este pode ser chamado de princípio da objetividade (em oposição à subjetividade) ou de realismo do senso comum (ver o capítulo 3). Tal princípio não quer dizer que os cientistas sejam sempre “objetivos” ou mesmo que a objetividade em qualquer sentido absoluto seja possível entre os seres humanos. O que ele quer postular é que um mundo objetivo existe fora da influência das percepções subjetivas humanas. A maioria dos cientistas — embora nem todos — acredita nesse axioma.

Em segundo lugar, os cientistas assumem que este mundo não é caótico, e sim estruturado de alguma maneira, e que a maioria dos aspectos dessa estrutura, se não todos, pode ser tratada pelas ferramentas da investigação científica. Uma ferramenta básica usada em toda atividade científica é o teste. Todo fato novo

e toda explicação nova precisam ser testados repetidas vezes, de preferência por investigadores diferentes, que usem métodos distintos (ver os capítulos 3 e 4). Cada confirmação reforça a probabilidade de um fato ou explicação ser “verdadeiro”, e cada falseamento ou refutação reforça a probabilidade de a teoria concorrente ser a correta. Uma das características mais distintivas da ciência é sua abertura ao desafio. A prontidão para abandonar uma crença corrente quando algo novo e melhor é proposto é uma fronteira importante entre a ciência e o dogma religioso.

O método usado para testar a “veracidade” em ciência varia, dependendo de o que está sendo testado ser um fato ou uma explicação. A existência do continente de Atlântida entre a Europa e a América foi posta em dúvida pela primeira vez quando ninguém conseguiu encontrá-lo nas primeiras travessias do Atlântico, no final do século xv e no começo do xvi. Depois de levantamentos oceanográficos completos do oceano Atlântico e, o que é mais convincente ainda, depois que fotografias de satélite foram feitas neste século, as novas evidências provaram de uma vez por todas que não existe tal continente. Muitas vezes, em ciência, a verdade absoluta sobre um fato pode ser estabelecida. Mas a verdade absoluta sobre uma teoria ou explicação é muito mais difícil, e geralmente leva muito mais tempo para ganhar aceitação. A “teoria” da evolução pela seleção natural não foi aceita como válida pelos cientistas durante mais de cem anos; e até hoje, em algumas seitas religiosas, há quem não acredite nela.

Em terceiro lugar, a maioria dos cientistas assume que há uma continuidade histórica e causal entre todos os fenômenos no universo material, e eles incluem na esfera dos estudos científicos legítimos tudo o que se sabe que existe ou que acontece neste universo. Porém eles não vão além do mundo material. Os teólogos também podem se interessar pelo mundo físico, mas além deste eles acreditam em um mundo metafísico ou espiritual, habitado por almas,

espíritos, anjos ou deuses, e geralmente acredita-se que esse paraíso ou nirvana seja o futuro local de descanso de todos os crentes após a morte. Tais construções sobrenaturais estão além dos domínios da ciência.

Como a ciência difere da filosofia

A fronteira entre a ciência e a filosofia é mais difícil de determinar do que aquela entre a ciência e a teologia, e isso levou a tensões entre cientistas e filósofos durante a maior parte do século xix. A filosofia e a ciência eram uma atividade única no tempo dos antigos gregos. A separação das duas começou a ter lugar na Revolução Científica; mas, até Immanuel Kant, William Whewell e William Herschel, muitos dos que contribuíram para o avanço da ciência eram também filósofos. Autores posteriores, como Ernst Mach ou Hans Driesch, começaram como cientistas e depois passaram a se dedicar à filosofia.

Será que não existe uma fronteira entre ciência e filosofia? A busca e a descoberta de fatos é certamente assunto exclusivo da ciência; mas, em outras partes, há uma considerável sobreposição entre ambas. Teorizar, generalizar e estabelecer um arcabouço conceitual para seu campo é algo que os cientistas consideram parte de sua tarefa; com efeito, é isso que faz um verdadeiro cientista. No entanto, muitos filósofos da ciência sentem que teorizar e formar conceitos são atribuições da filosofia. Para o bem ou para o mal, nas últimas décadas a maior parte desse esforço tem sido abraçada pelos cientistas, e alguns conceitos básicos desenvolvidos pelos biólogos foram mais tarde absorvidos pelos filósofos e agora também são conceitos filosóficos.

Para substituir seu antigo foco principal, os filósofos da ciência se especializaram em elucidar os princípios pelos quais teorias e conceitos são formados. Eles procuram as regras que especificam

operações que respondem às perguntas do tipo “O quê?”, “Como?” e “Por quê?” com as quais os cientistas se deparam. O principal ramo da filosofia relacionada com a ciência hoje é testar a “lógica da justificativa” e a metodologia da explicação (ver o capítulo 3). No seu pior, esse tipo de filosofia tende a descambar para confusões lógicas e sofismas semânticos. No seu melhor, ele forçou os cientistas a terem mais responsabilidade e a serem mais precisos.

Embora os filósofos da ciência em geral declarem que suas regras metodológicas são meramente descritivas — e não prescritivas —, muitos deles parecem considerar que sua tarefa é determinar o que os cientistas *deveriam* fazer. Os cientistas geralmente não prestam atenção a esses conselhos normativos e escolhem a abordagem que (esperam eles) levará mais rapidamente a um resultado; essas abordagens podem diferir de um caso para o outro.

Talvez a maior falha da filosofia da ciência, até apenas poucos anos atrás, tenha sido o fato de que ela tomou a física como o modelo ideal de ciência. O resultado foi que a assim chamada filosofia da ciência acabou sendo apenas uma filosofia das ciências físicas. Isso mudou sob a influência dos filósofos mais jovens, muitos dos quais especializados na filosofia da biologia. A íntima conexão que existe hoje entre a filosofia e as ciências da vida é evidente, a julgar pela quantidade de artigos publicados no periódico *Biology and Philosophy*. Através dos esforços desses jovens filósofos, os conceitos e métodos usados nas ciências biológicas tornaram-se agora componentes importantes da filosofia da ciência.

Trata-se aqui de um avanço extremamente desejável tanto para a filosofia quanto para a biologia. Generalizar suas visões da natureza de modo a contribuir com a filosofia da ciência deveria ser o objetivo de todo cientista. Enquanto a filosofia da ciência esteve restrita às leis e aos métodos da física, no entanto, não foi possível para os biólogos dar esse tipo de contribuição. Felizmente, esse não é mais o caso.

A incorporação da biologia modificou muitos dos pilares da filosofia da ciência. Como veremos nos capítulos 3 e 4, a rejeição ao determinismo estrito e ao apego a leis universais, a aceitação de previsões meramente probabilísticas e de narrativas históricas, o reconhecimento do papel importante dos conceitos na formação de teorias, o reconhecimento do conceito de população e do papel de indivíduos únicos e vários outros aspectos do pensamento biológico afetaram fundamentalmente a filosofia da ciência. Com o probabilismo dominando hoje em dia, todos os aspectos da análise lógica baseados em presunções tipológicas ficaram muito vulneráveis. A certeza absoluta que tem sido o ideal dos filósofos da ciência após Descartes parece agora um objetivo cada vez menos importante.

Como a ciência difere das humanidades

No que diz respeito à fronteira entre a ciência e as humanidades, a tendência dos autores no passado de ignorar a heterogeneidade de ambos os campos levou a vários desentendimentos. Há mais diferenças entre a física e a biologia evolutiva — ambas ramos da ciência — do que entre a biologia evolutiva e a história (uma das humanidades). A crítica literária não tem virtualmente nada em comum com a maioria das outras disciplinas das humanas, e menos ainda com a ciência.

Quando C. P. Snow escreveu o seu *As duas culturas*, em 1959, o que ele de fato descrevia era o buraco entre a física e as humanidades. Como outros pensadores de sua época, ele ingenuamente assumiu que a física poderia representar a ciência como um todo. O buraco entre a física e as humanidades, como ele corretamente assinalou, é na verdade virtualmente intransponível. Simplesmente não há caminho da física para a ética, a cultura, a mente, o livre-arbítrio e outras preocupações do humanismo. A ausência, na física, desses

importantes tópicos contribuiu para a alienação entre os cientistas e os humanistas denunciada por Snow. No entanto, todos esses assuntos estão fortemente relacionados com as ciências da vida.

Da mesma forma, quando E. M. Carr (1961), um humanista, contrastou a história com “as ciências”, ele encontrou cinco aspectos nos quais elas diferiam: (1) A história, disse ele, lida exclusivamente com o que é único, e a ciência, com o que é geral. (2) A história não ensina lições. (3) A história, diferentemente da ciência, é incapaz de fazer previsões. (4) A história é necessariamente subjetiva, enquanto a ciência é objetiva. (5) A história, diferentemente da ciência, tange a questões de religião e de moral. O que Carr não enxergou foi que essas diferenças valem mais para as ciências físicas, não tanto para a biologia funcional. No entanto, os enunciados 1, 3 e 5 se aplicam tanto à biologia evolutiva quanto à história, e, como o próprio Carr admite, algumas dessas afirmações (o enunciado 2, por exemplo) não são estritamente verdadeiras nem mesmo para a história. Em outras palavras, a cisão aguda entre as “ciências” e as “não-ciências” não existe, uma vez que a biologia é admitida no reino da ciência.⁶

O estranhamento entre a ciência e as humanidades é frequentemente atribuído à falha dos cientistas em apreciar o “elemento humano” durante as suas pesquisas. Mas nem toda a culpa deve recair sobre os ombros dos cientistas. Um conhecimento rudimentar de algumas descobertas da ciência, particularmente da biologia evolutiva, das ciências do comportamento, do desenvolvimento humano e da antropologia física, é indispensável para a maior parte do trabalho na área das humanidades. No entanto, muitos humanistas falham em adquirir esse conhecimento e demonstram uma ignorância constrangedora desses assuntos em seus escritos. Muitos se saem com a frase “eu sou péssimo em matemática” para se desculpar pela sua má compreensão da ciência. Na verdade, há pouca matemática envolvida nas partes da ciência com as quais os

humanistas mais precisam se familiarizar. Por exemplo, não há uma única fórmula matemática em *A origem das espécies* de Darwin ou no meu *O desenvolvimento do pensamento biológico* (1982). Um entendimento de biologia humana deveria ser um componente necessário e inseparável dos estudos de humanidades. A psicologia, antes classificada dentro das humanidades, hoje é considerada uma ciência biológica. Como alguém pode escrever qualquer coisa nas humanidades, seja na história, seja na literatura, sem um entendimento considerável do comportamento humano?

Snow enfatizou esse ponto corretamente. Há uma ignorância deplorável, entre a maioria das pessoas, a respeito até dos fatos mais simples da ciência. Por exemplo, vários autores ainda dizem não poder acreditar que o olho seja resultado de uma série de acidentes. O que essa frase revela é que seu autor não tem conhecimento algum do mecanismo da seleção natural, que é um processo *antiacaso* — e não acidental. A mudança evolutiva ocorre porque certas características dos indivíduos são mais adequadas do que outras às presentes circunstâncias ambientais de uma espécie, e essas características mais adaptativas se disseminam nas gerações posteriores por meio de taxas diferenciadas de sobrevivência e reprodução — em outras palavras, por meio da seleção. O acaso certamente tem o seu papel na evolução, como Darwin bem sabia, mas a seleção natural — o mecanismo primordial da mudança evolutiva — não é um processo acidental.

A ignorância a respeito das descobertas da biologia é particularmente nociva sempre que os humanistas são forçados a se confrontar com problemas políticos, como a superpopulação global, a disseminação de doenças infecciosas, o esgotamento dos recursos naturais não-renováveis, as mudanças climáticas deletérias, a necessidade de ampliar a agricultura no mundo inteiro, a destruição dos habitats naturais, a proliferação do comportamento criminoso e as falhas no sistema educacional. Nenhum desses proble-

mas pode ser abordado de forma satisfatória sem se levar em conta as descobertas da ciência, sobretudo da biologia. E, mesmo assim, freqüentemente os políticos agem ignorando-as.

OS OBJETIVOS DA PESQUISA CIENTÍFICA

Muitas vezes se pergunta por que fazemos ciência. Ou para que serve a ciência. Há duas respostas bem distintas a essa pergunta. A insaciável curiosidade dos seres humanos e o desejo de uma melhor compreensão do mundo em que vivem são as razões primárias para o interesse em ciência da maioria dos cientistas. Elas se baseiam na convicção de que nenhuma das teorias filosóficas ou puramente ideológicas sobre o mundo pode competir, a longo prazo, com a compreensão do mundo proporcionada pela ciência.

Contribuir para essa melhor compreensão do mundo é fonte de grande satisfação para o cientista; com efeito, é motivo de júbilo. A ênfase é geralmente dada à descoberta, para a qual a sorte às vezes ajuda. Mas a alegria talvez seja ainda maior quando se tem sucesso no difícil desafio intelectual de desenvolver um novo conceito, um conceito que possa integrar uma massa de fatos até então díspares, ou que funcione melhor como base para teorias científicas. A compensar a alegria da pesquisa, é claro, está a necessidade incessante da tediosa coleta de dados, a decepção (quando não o constrangimento) com uma teoria invalidada, a recalcitrância de alguns assuntos de pesquisa e uma miríade de outras frustrações.⁷

Um objetivo inteiramente diferente é usar a ciência como meio de controlar o mundo, suas forças e seus recursos. Esse segundo objetivo é defendido sobretudo pelos cientistas aplicados (como aqueles nas áreas da medicina, saúde pública e agricultura), engenheiros, políticos e pelo cidadão médio. Mas o que alguns políticos e eleitores esquecem é que, quando se trata dos males da

poluição, da urbanização, da fome ou da explosão populacional, não basta combater os sintomas. Não é possível curar a malária com aspirina, assim como não é possível lutar contra os males econômicos e sociais sem atacar suas causas. Nossa maneira de lidar com a discriminação racial, o crime, a dependência de drogas, a mendicância e problemas semelhantes, e o sucesso que teremos em eliminá-los, dependerá consideravelmente da nossa compreensão das raízes biológicas dessas questões.

Esses dois objetivos da ciência — satisfazer a curiosidade e melhorar o mundo — não são domínios inteiramente diferentes, porque mesmo a ciência aplicada, particularmente a ciência na qual se baseiam as políticas públicas, conta com a ciência básica. Na maioria dos casos, os cientistas são em grande parte motivados pelo simples desejo de uma melhor compreensão de fenômenos intrigantes do nosso mundo.

Tanto na ciência básica quanto na aplicada, qualquer discussão dos objetivos da pesquisa científica sempre conduz a um questionamento sobre valores. Até que ponto a nossa sociedade pode bancar alguns grandes projetos científicos como um superacelerador de partículas ou uma estação espacial, considerando a estreiteza dos resultados que podemos esperar obter? Até que ponto devemos considerar antiéticos certos experimentos, particularmente com mamíferos (cachorros e primatas)? Há algum risco de que o trabalho com material embrionário humano leve a práticas antiéticas? Quais experimentos em psicologia humana ou em medicina clínica podem ser prejudiciais aos voluntários das pesquisas?

Enquanto as ciências físicas predominaram, a ciência era geralmente tida como isenta de valores. Durante a rebelião de estudantes da década de 1960, alguns grupos que se ressentiam dessa arrogância promoveram o slogan “Abaixo a ciência isenta de valores”. Desde a ascensão da biologia, particularmente a genética e a biologia evolutiva, tem ficado claro que as descobertas e as teorias científicas têm

impacto sobre os valores, embora não esteja claro até que ponto a ciência pode produzir valores (ver o capítulo 12). Alguns dos oponentes de Darwin, como Adam Sedgwick, acusaram o darwinismo de destruir valores morais. Ainda hoje, os criacionistas combatem a biologia evolutiva porque têm a convicção de que ela mina os valores da teologia cristã. O movimento eugenista neste século [xx] claramente derivou seus valores da ciência da genética humana. E a razão pela qual a sociobiologia foi tão atacada na década de 1970 foi que ela parecia promover certos valores políticos incompatíveis com os de seus adversários. Quase todas as principais ideologias políticas e religiosas trazem consigo valores que elas alegam derivar da ciência, e quase todas as ideologias trazem consigo outros valores que são incompatíveis com certas descobertas da ciência.

Paul Feyerabend (1970) chegou mesmo a sugerir que um mundo sem ciência “seria mais agradável que o mundo em que vivemos hoje”. Não sei se isso é verdade. Haveria menos poluição e menos câncer causado pela poluição, menos aglomeração urbano e menos dos subprodutos adversos da sociedade de massas. Mas também seria um mundo com alta mortalidade infantil, uma expectativa de vida de apenas 35 a quarenta anos e sem nenhuma maneira de escapar do calor do verão ou de se proteger do frio severo no inverno. Também é fácil esquecer os vastos benefícios da ciência (incluindo a ciência médica e agrícola) ao reclamar dos seus efeitos colaterais deletérios. A maioria desses chamados males da ciência e tecnologia poderia ser eliminada; os cientistas sabem o que deveria ser feito, mas seu conhecimento precisa ser traduzido em legislação e no cumprimento dessa legislação, e há resistências dos políticos e de grande parte do público votante para que isso aconteça.

Minha própria visão sobre as contribuições da ciência se alinha mais com a de Karl Popper, que dizia o seguinte:

Ao lado da música e da arte, a ciência é a maior, mais bela é mais iluminadora das conquistas do espírito humano. Abomino o modismo intelectual tão barulhento hoje em dia que tenta denegrir a ciência, e admiro para além de qualquer coisa os maravilhosos resultados alcançados em nossa época pelo trabalho dos biólogos e dos bioquímicos, tornados disponíveis através da medicina para os que sofrem em toda a nossa linda Terra.

A ciência e o cientista

Ouvimos com frequência que a ciência pode fazer isto ou que a ciência não pode fazer aquilo, mas é claro que são os cientistas que podem ou não fazer algo. Um cientista, no melhor dos casos, é alguém dedicado, altamente motivado, escrupulosamente honesto, generoso e cooperativo. Os cientistas, porém, são apenas seres humanos e nem sempre correspondem a esse ideal profissional. Considerações políticas, teológicas ou financeiras que surgem fora da ciência não deveriam interferir no julgamento científico, mas interferem.

Os cientistas têm os seus valores e tradições específicos, que eles aprendem com um mentor, um colega mais velho ou algum outro modelo. Isso inclui não só o esforço para evitar fraudes e desonestidade como também para dar o crédito devido aos concorrentes caso eles tenham a prioridade em uma descoberta. Um bom cientista defenderá tenazmente suas próprias reivindicações de prioridade, mas ao mesmo tempo ele em geral é ansioso para agradar aos líderes de sua área de pesquisa e algumas vezes seguirá a sua autoridade, mesmo quando deveria ser mais crítico.

Qualquer trapaça ou fabricação de dados será descoberta mais cedo ou mais tarde, e é o fim de uma carreira; por essa razão, a fraude não é uma opção viável na ciência. A incoerência talvez seja um tipo mais comum de falha; provavelmente não existe cien-

tista que escape dela inteiramente. Charles Lyell, cujos *Principles of geology* influenciaram o pensamento de Darwin, pregava o uniformitarismo, mas até seus contemporâneos ficaram espantados ao ver quão não-uniformitarista era sua própria teoria sobre a origem das espécies. O próprio Darwin também não estava livre de incoerências; ele aplicou o pensamento populacional ao explicar a adaptação pela seleção natural, mas empregou uma linguagem tipológica em algumas de suas discussões sobre a especiação. Lamarck proclamou em alto e bom som que era um mecanicista estrito, esforçando-se para explicar tudo em termos de causas e forças mecânicas, e ainda assim sua discussão sobre a perfeição inevitável através das mudanças evolutivas soa ao leitor moderno como uma adesão a um princípio (não-mecanicista) da perfeição. Nenhum dos apoiadores de Darwin reforçou a importância da seleção natural mais do que A. R. Wallace, mas, quando se tratou de aplicá-la ao homem, Wallace “amarelou”.

Algumas falhas nas descobertas e nas hipóteses de muitos cientistas são claramente induzidas pela esperança. Quando um investigador encontrou 48 cromossomos na espécie humana no começo dessa linha de pesquisa, a descoberta foi subseqüentemente confirmada por vários outros investigadores porque era esse o número que eles esperavam encontrar. O número correto (46) só foi estabelecido depois que três novas técnicas diferentes foram introduzidas.

Reconhecendo que o erro e a incoerência são amplamente disseminados na ciência, Karl Popper propôs em 1981 um conjunto de regras de ética profissional para o cientista. O primeiro princípio é que não existe a autoridade; as inferências científicas vão muito além do que qualquer indivíduo é capaz de dominar, incluindo os especialistas. Segundo, todos os cientistas cometem erros o tempo todo; os erros parecem ser inevitáveis. É preciso procurá-los, analisá-los quando eles são encontrados e aprender com

eles; esconder erros é um pecado imperdoável. Terceiro, embora a autocritica seja importante, ela deve ser suplementada pela crítica de terceiros, que podem ajudar a descobrir os erros de uma pessoa e a corrigi-los. Para poder aprender com os próprios erros, é preciso reconhecê-los quando os outros chamam a atenção para eles. E, finalmente, é preciso ter consciência dos próprios erros quando se chamar atenção para os dos outros.

A maior recompensa para um cientista é o prestígio entre seus pares. Tal prestígio depende de fatores como quantas descobertas importantes ele fez e qual foi a sua contribuição para a estrutura conceitual da sua disciplina. Por que a prioridade e o reconhecimento pelos pares são tão importantes para a maioria dos cientistas? Por que alguns cientistas tentam denegrir seus pares (ou concorrentes)? Como um cientista é recompensado por seus feitos? Como os cientistas se relacionam entre si e com o resto da sociedade? Todas essas perguntas têm sido feitas por pesquisadores da sociologia da ciência, em especial Robert Merton, que virtualmente fundou essa disciplina. Como Merton mostrou, boa parte da ciência moderna é feita por grupos de pesquisa, e as alianças são geralmente formadas sob a égide de certos dogmas.⁸ Mas, apesar de certo grau de dissensão na ciência, o que mais impressiona quem a vê de fora é o notável consenso entre os cientistas na última metade do século xx.

Esse consenso se reflete particularmente bem na internacionalidade da ciência. O inglês está se tornando rapidamente a língua franca da ciência, e em alguns lugares, como a Escandinávia, a Alemanha e a França, publicações proeminentes têm adotado nomes em inglês e publicado primariamente artigos em língua inglesa. Um cientista que viaje para outro país, mesmo um americano visitando a Rússia ou o Japão, se sente em casa quando na companhia de colegas desses lugares. Numerosos artigos publicados hoje em periódicos científicos têm co-autores de países dife-

rentes. Cem anos atrás, os livros e artigos científicos muito frequentemente possuíam um sabor nacional característico, mas isso está ficando cada vez mais raro.

Todos os cientistas que atingem grandes objetivos tendem a ser ambiciosos e a trabalhar com afinco. Não existe cientista de meio período. Muitos trabalham de quinze a dezessete horas por dia, ao menos em algumas fases da carreira. Ainda assim, a maioria deles tem interesses amplos, como fica evidenciado por suas biografias; vários cientistas são músicos amadores, por exemplo. Alguns são extrovertidos, outros, tímidos. Alguns são excessivamente prolíficos, enquanto outros se concentram na produção de uns poucos grandes livros ou artigos. Não acho que exista um temperamento ou uma personalidade definida que possamos identificar como do cientista típico.

Tradicionalmente, alguém se torna biólogo ou por formação na área médica ou por ter sido um jovem naturalista. Hoje, é comum para um jovem se empolgar com as ciências da vida através dos meios de comunicação, sobretudo por filmes sobre a natureza na televisão, de visitas a um museu (geralmente à sala dos dinossauros) ou de um professor inspirador. Há também milhares de jovens observadores de pássaros, alguns dos quais acabarão se tornando biólogos profissionais (como foi o meu caso). O ingrediente mais importante é a fascinação diante das maravilhas das criaturas vivas. E isso permanece com a maioria dos biólogos para o resto da vida. Eles nunca perdem a empolgação com a descoberta científica, seja ela empírica ou teórica, nem o amor pela perseguição de novas idéias, novos vislumbres, novos organismos. E muita coisa na biologia tem uma relação direta com as circunstâncias e com os valores pessoais do biólogo. Ser um biólogo não significa ter um emprego; significa escolher um estilo de vida.⁹

3. Como a ciência explica o mundo natural?

As primeiras tentativas de explicar o mundo natural invocavam o sobrenatural. Desde o animismo mais primitivo até as grandes religiões monoteístas, qualquer coisa que fosse intrigante e aparentemente inexplicável era atribuída às atividades de espíritos ou deuses. Os antigos gregos deram início a uma abordagem diferente. Eles tentaram explicar os fenômenos do mundo através de forças naturais. A filosofia, que se desenvolveu no século VI antes de Cristo, se ocupou cada vez mais da tarefa de explicar o mundo e tentar determinar qual deveria ser o ideal de “saber”. Os gregos basearam suas explicações em observação e reflexão, embora a metafísica sempre tivesse tido um papel considerável. Foi desse começo que a filosofia da ciência que conhecemos hoje gradualmente se desenvolveu.

O terceiro tipo de esforço explicativo foi a ciência, que surgiu durante a Revolução Científica. As explicações sobrenaturais, a filosofia e a ciência seriam talvez mais bem consideradas não como três estágios consecutivos, mas três abordagens complementares ao problema do saber. A história do pensamento humano mostra

que esses esforços distintos evoluíram um a partir do outro sem grandes rupturas. Por exemplo, muitos dos grandes filósofos, até mesmo Kant, incluíam Deus em seus esquemas explicativos. Antes de Darwin, Deus também era aceito como um fator explicativo por muitos biólogos. Depois da ascensão da ciência, a filosofia continuou a existir e a prosperar; o que mudou foram seus objetivos. À medida que a ciência gradualmente se emancipou da filosofia, os filósofos começaram a se afastar reflexivamente do trabalho dos cientistas e a se concentrar na análise das atividades dos cientistas.

O objetivo final da ciência é fazer avançar nosso conhecimento do mundo — sobre esse ponto, tanto os cientistas quanto os filósofos da ciência concordam. O cientista formula perguntas sobre o que não é conhecido ou compreendido e tenta respondê-las. A primeira resposta é chamada de conjectura ou hipótese, e serve como uma tentativa de explicação. Mas o que é realmente uma explicação? Quando um fenômeno intrigante é encontrado na vida cotidiana, ele geralmente é explicado em termos daquilo que conhecemos ou do que é racional. Por exemplo, um eclipse da Lua provavelmente se deve à sombra da Terra descendo sobre a Lua. A fauna e a flora das ilhas Galápagos devem ter chegado lá por dispersão sobre a água, porque essas ilhas vulcânicas obviamente nunca estiveram ligadas ao continente sul-americano. Mas não basta apenas ter uma explicação racional. É preciso igualmente se certificar de que a resposta é verdadeira, ou pelo menos o mais próxima possível da verdade, tomando por base o conhecimento disponível. Essa meta do cientista também é o objetivo do filósofo da ciência.

O que tem sido motivo de controvérsia entre os filósofos desde a era dos gregos até os tempos modernos é a forma como uma explicação do mundo natural deve ser construída e testada. Diversos filósofos tentaram formular os princípios pelos quais a nossa compreensão do mundo poderia avançar (ou, como se dizia com frequência, sobre como a verdade poderia ser encontrada). Entre eles,

em geral são listados Descartes, Leibniz, Locke, Hume, Kant, Herschel, Whewell, Mill, Jevons, Russell e Popper. Curiosamente, o nome de Darwin raras vezes é incluído nessas listas, mesmo tendo sido ele um dos maiores filósofos de todos os tempos.¹ Com efeito, grande parte da filosofia da biologia foi fundada por Darwin.

Estavam esses filósofos da ciência apenas tentando descrever fielmente os métodos do cientista, vistos pelos olhos do filósofo, ou sua missão era dizer aos cientistas como eles deveriam construir suas explicações e seus testes de modo que suas descobertas se constituíssem verdadeiramente em “boa” ciência?² Se este era o caso, temo que até agora isso tenha surtido pouco efeito. Não conheço um único biólogo cujas formulações teóricas tenham sido muito afetadas pelas normas propostas pelos filósofos da ciência. Os cientistas em geral tocam suas pesquisas adiante sem prestar muita atenção às sutilezas da metodologia. A única exceção é a insistência de Karl Popper no falseamento (ver abaixo), que foi amplamente aceito pelos biólogos em princípio, embora raramente tenha funcionado na prática.

Por que os filósofos da ciência ainda hoje se preocupam tanto com a maneira como os cientistas constroem e testam suas explicações? Afinal de contas, a ciência tem tido uma série quase ininterrupta de sucessos desde a Revolução Científica. Claro, às vezes uma teoria errônea é adotada temporariamente, mas ela é logo refutada na competição com outras teorias. Casos de refutação de uma grande teoria científica são notavelmente raros. No geral, a confiabilidade dos grandes postulados da ciência é inquestionável. Giere (1988) sugere que o legado do ceticismo cartesiano durante a Revolução Científica é o responsável pelas persistentes dúvidas dos filósofos.

Os meios de comunicação, com seus anúncios diários de grandes descobertas novas e desafios a teorias existentes, tendem a induzir erroneamente o não-cientista a acreditar que a ciência é

incapaz de produzir certeza ou “verdade” sobre o que quer que seja. Ao contrário: as teorias básicas da ciência, muitas delas com cinquenta ou mais de 150 anos de idade, são confirmadas com frequência. Mesmo em um campo controverso como a biologia evolutiva, o arcabouço conceitual básico estabelecido por Darwin em 1859 mostrou-se notavelmente robusto. Todas as tentativas, ao longo dos últimos 130 anos, de invalidar o darwinismo (e houve centenas delas) foram malsucedidas, e o mesmo vale também para a maioria das outras áreas da biologia.

No entanto, devemos reconhecer que nossos órgãos dos sentidos são falíveis e nosso raciocínio, mais ainda. Portanto, é legítima a tarefa da filosofia de escrutinar os métodos por meio dos quais os cientistas obtêm conhecimento — e até de aconselhar os cientistas sobre a forma mais confiável de formular e testar teorias. O ramo da filosofia que lida com o problema do que conhecemos e de como conhecemos é chamado epistemologia. Ela é hoje a principal área de interesse da filosofia da ciência.³

UMA BREVE HISTÓRIA DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

Previsivelmente, o surgimento do interesse na epistemologia coincidiu com a Revolução Científica, ou foi causado por ela. Sendo a astronomia e a mecânica as ciências mais ativas daquela época, a observação e a matemática eram tidas em alta conta, e sir Francis Bacon (com a indução) e Descartes (com a geometria) se tornaram seus apóstolos.

Com Bacon, a indução se tornou o método científico dominante por dois séculos. De acordo com essa filosofia, o cientista desenvolve suas teorias simplesmente por meio do registro, das medidas e da descrição de observações, sem ter nenhuma hipótese prévia ou expectativa preconcebida. Quando a indução

virou moda na Inglaterra do começo do século XIX, Darwin proclamou ser um verdadeiro seguidor de Bacon, quando na verdade ele adotou uma abordagem mais ou menos hipotético-dedutiva (ver abaixo).⁴ Mais tarde, Darwin fez troça da indução, dizendo que, se alguém de fato acreditasse nesse método, “poderia igualmente ir até uma cascalheira, contar as pedrinhas e descrever as [suas] cores”.

Liebig (1863) foi um dos primeiros cientistas proeminentes a repudiar a indução baconiana, argumentando, de forma convincente, que nenhum cientista jamais seguiu ou pôde seguir o *Novum organum* de Bacon. A indução por si só não é capaz de gerar novas teorias. A crítica incisiva de Liebig ajudou a pôr um fim ao reinado do indutivismo,⁵ e daí em diante passou a ser considerado ofensa chamar alguém de indutivista (ou “coleccionador de selos”). Muitos dos críticos dessa abordagem empírica, no entanto, ignoraram o fato de que os dados que formam a base de qualquer esforço científico permaneceram tão indispensáveis quanto sempre foram; o que deveria ser criticado não era a coleta de fatos em si, mas a maneira como esses fatos eram usados na formação de teorias. Em algumas ciências (a biologia em particular) que se fiam na construção de narrativas históricas, o método científico essencial hoje é basicamente indutivo.

Mais adiante no século XIX, particularmente sob a influência do trabalho de Frege (1884) e de outros lógicos e matemáticos, a lógica se tornou uma influência dominante na filosofia da matemática e da física. Isso era particularmente esclarecedor nas áreas nas quais leis universais matematicamente formuladas tinham um papel importante, como as ciências físicas. Era menos apropriado no caso da biologia, em que abundam o pluralismo, o probabilismo e fenômenos puramente qualitativos, assim como históricos, enquanto leis estritamente universais são virtualmente ausentes. Como consequência, desenvolveu-se uma filosofia da ciência

que parecia feita sob encomenda para a situação das ciências físicas, mas que era em grande parte inadequada para a biologia.

Verificação e falseamento

Neste século xx, a filosofia que dominou por muito tempo a ciência anglo-americana foi o empirismo lógico, que surgiu do Círculo de Viena de positivistas lógicos (Reichenbach, Schilick, Carnap, Feigl) nas décadas de 1920 e 1930. O empirismo lógico se baseava em um tripé: (1) o trabalho de vários matemáticos e lógicos do século xx; (2) o empirismo clássico de David Hume, transmitido através de Mill a Russell e Mach; (3) as ciências físicas, em especial as ciências físicas clássicas, tal como eram compreendidas antes da relatividade e da mecânica quântica.

A abordagem da confirmação científica endossada pelos positivistas lógicos era o tradicional método hipotético-dedutivo (H-D), e a verificação por meio de reiterados testes era considerada o melhor critério para determinar quão boa era uma teoria. Se os testes confirmassem uma teoria, dir-se-ia que ela havia sido verificada. A verificação fortalece muito as teorias e algumas vezes leva à modificação construtiva. É preciso assumir, no entanto, que a verificação “prova” de forma absoluta que dada teoria é verdadeira. Esses métodos levaram algumas vezes à verificação do que se mostrou depois ser uma teoria errada.⁶

Popper concordava com os positivistas lógicos que uma teoria será “considerada mais satisfatória quanto maior for a rigidez dos testes independentes aos quais ela sobreviveu”, mas insistia em que o falseamento era a única maneira de finalmente eliminar uma teoria inválida. Se uma teoria falha no teste, ela foi falseada. No entanto, o falseamento não é uma questão simples. Não é como provar que $2 + 2$ não é igual a 5. Ele é especialmente inadequado para o teste de teorias probabilísticas, classe que inclui a maioria

das teorias biológicas. A ocorrência de exceções a uma teoria probabilística não constitui necessariamente seu falseamento. E, em campos como a biologia evolutiva, nos quais é preciso construir narrativas históricas para explicar certas observações, é muitas vezes bastante difícil, se não impossível, falsear de maneira decisiva uma teoria inválida. O enunciado categórico de que um único falseamento requer o abandono de uma teoria pode ser verdadeiro para teorias baseadas nas leis universais das ciências físicas, mas geralmente não é verdade para as teorias da biologia evolutiva.⁷

Novos modelos de explicação científica

A filosofia da ciência moderna começou em 1948, com um artigo escrito por Carl Hempel e Paul Oppenheim, que seria detalhado por Hempel em 1965. Nesses ensaios, Hempel propôs um novo modelo de explicação científica, que chamou de modelo dedutivo-nomológico (D-N). Esse esquema teve seu apogeu nos anos 1950 e 1960 e também ficou conhecido como a “visão recebida”.

A idéia por trás da explicação dedutivo-nomológica é a seguinte: uma explicação científica é um argumento dedutivo no qual um enunciado que descreva o evento a ser explicado é deduzido a partir de uma ou mais leis universais somadas a enunciados sobre fatos particulares (regras de correspondência). De acordo com essa visão, uma teoria científica é um “sistema axiomático dedutivo”, cujas premissas são baseadas em uma lei.

O modelo D-N original era muito tipológico e determinista, e logo seria modificado para poder lidar com leis probabilísticas ou estatísticas. A cada ano publicavam-se novos artigos que sugeriam maneiras e métodos para corrigir as falhas reais ou aparentes na visão recebida. Alguns desses métodos foram propostos como teorias genuinamente novas, embora em última análise eles derivassem do modelo de Hempel.

Uma dessas modificações ficou conhecida como a concepção semântica da estrutura das teorias.⁸ Para Beatty (1981, 1987), um proponente desse novo modelo, uma teoria é a definição de um sistema, e aplicações de uma teoria são instanciações dessa teoria. Tais aplicações podem ou não ser espacialmente restritas. As teorias não são nem gerais nem permanentes, e portanto são compatíveis com soluções plurais e com a mudança evolutiva. A capacidade da visão semântica de representar fielmente a teoria evolutiva induziu Beatty, Thompson, Lloyd e outros filósofos a adotarem a visão semântica.⁹

Embora essa teoria fuja de várias das fraquezas da visão recebida, ela enfrenta duas dificuldades no que diz respeito à prática da biologia. A primeira delas é que, quando se pede uma definição dessa abordagem, o que se obtém são visões excessivamente diferentes de diferentes semanticistas. A segunda pedra no caminho é a seguinte: como a visão semântica pode ser aplicada pelo biólogo em exercício da função? O que os filósofos oferecem é uma descrição de teorias que foram desenvolvidas pelos cientistas. Mas tal descrição não é suficientemente normativa para informar ao biólogo como desenvolver *novas* teorias. Pelo menos assim me parece. Quando uma teoria falha em cumprir com as especificações de uma teoria semântica? A falta de resposta a essa questão talvez seja a razão pela qual não sinto que a abordagem semântica tenha logrado muita aceitação na biologia, apesar das suas vantagens em relação à visão recebida (que hoje é considerada mais ou menos obsoleta). O que tem se notado cada vez mais é que a avaliação de uma teoria não é uma questão de simples regras lógicas, e que a racionalidade precisa ser construída em termos mais amplos que aqueles oferecidos pela lógica dedutiva ou indutiva.

Cada um dos vários esquemas explicativos deste século tem ficado na moda por dez anos ou mais, para ser então substituído por uma versão atualizada ou então por um esquema inteira-

mente novo.¹⁰ A década de 1980 foi particularmente ativa para a filosofia da ciência, mas essa atividade não levou a um consenso entre os filósofos sobre como melhor construir e testar uma explicação científica. Em sua pesquisa recente, Salmon (1988) escreve: “Parece-me que há pelo menos três poderosas escolas de pensamento hoje — os pragmáticos, os dedutivistas e os mecanicistas — e que elas não tendem a entrar em acordo substancial algum no futuro próximo”.

DESCOBERTA E JUSTIFICATIVA

A maioria dos cientistas e filósofos da ciência parece basicamente concordar que a ciência é um processo que se dá em dois passos. O primeiro envolve a *descoberta* de novos fatos, irregularidades, exceções ou aparentes contradições na natureza, e a formação de conjecturas, hipóteses ou teorias para explicá-los. O segundo diz respeito à *justificativa* — os procedimentos por meio dos quais tais teorias são testadas e validadas.

Para a maioria dos filósofos, o caminho para uma nova teoria começa com a formulação de uma conjectura ou hipótese para resolver um enigma; essa hipótese é então submetida a testes rigorosos. Mas o cientista em exercício da função começa ainda mais cedo. Durante a fase de descoberta ele realiza uma grande quantidade de observações simples e de descrições de fatos. Quando encontra uma irregularidade inexplicada ou uma anomalia nos fatos que a ele se apresentam, a descoberta desse enigma o induz a fazer uma pergunta, e essa pergunta leva finalmente a uma conjectura ou hipótese.

Todo cientista ocasionalmente tem “palpites” sobre o significado ou a explicação desta ou daquela observação. Mas é apenas o teste desses palpites que conduz a descoberta científica à condição

de “verdade”. A justificativa — como se testam conjecturas, hipóteses ou teorias — se tornou uma preocupação dos filósofos da ciência, em grande parte porque ela é passível de análise lógica. A descoberta deriva “logicamente” da situação anterior apenas em raras ocasiões, e portanto a maioria dos filósofos tradicionalmente não tem considerado que ela seja de sua conta. Em vez disso, eles atribuem a descoberta ao acaso, a fatores psicológicos, ao *Zeitgeist* ou, pior, às condições socioeconômicas vigentes.

Popper (1968), por exemplo, afirmou: “A maneira como uma nova idéia ocorre a um homem [...] é irrelevante para a análise lógica do conhecimento científico. Este não se ocupa com questões de fato [...] mas apenas com questões de justificativa ou validade”. Ainda assim, aos olhos do cientista, o método que se usa para refutar uma hipótese errônea é em geral algo de interesse trivial, ao passo que a descoberta de um novo fato ou a formulação de uma nova teoria é freqüentemente da maior importância.¹¹

Fatores internos e externos da formação de teorias

Nenhum cientista vive num vácuo. Ele vive em um ambiente intelectual, espiritual, econômico e social, bem como científico. Que impacto essas influências têm na natureza das teorias que ele desenvolve? Historiadores das idéias tendem a responsabilizar fatores internos — ou seja, desdobramentos que ocorrem dentro da própria ciência — por novas teorias e novos conceitos. Historiadores sociais, no entanto, procuram fatores externos — ou seja, componentes do meio socioeconômico. No total, os sociólogos têm sido notavelmente malsucedidos em seus esforços.¹² O fato de que Charles Darwin e Alfred Russel Wallace, que tinham origens socioeconômicas totalmente distintas, chegaram independentemente à mesma teoria da evolução ilustra a irrelevância dos fatores externos. Com efeito, não conheço nenhuma evidência da influên-

cia de um fator socioeconômico no desenvolvimento de uma teoria biológica específica.¹³ O oposto, no entanto, algumas vezes é verdade: teorias científicas ou pseudocientíficas têm sido usadas por ativistas políticos para promover suas agendas particulares.¹⁴

Entre os fatores externos, é preciso distinguir entre os socioeconômicos e o *Zeitgeist* ou meio intelectual. Este, embora pareça desempenhar um papel restrito na proposta de novas teorias, parece ter um papel relevante na resistência a mudanças intelectuais que conflitam com crenças estabelecidas. Foi essa a razão pela qual a teoria da seleção natural de Darwin sofreu uma resistência tão maciça; era impossível acomodar uma teoria da evolução no mundo conceitual de Cuvier ou Agassiz.¹⁵

Teste

Como um cientista pode determinar se sua nova hipótese é válida? Submetendo-a a determinados testes. O filósofo que queira determinar quão boa é uma teoria faz a mesma coisa, mas o teste realizado pelos cientistas é às vezes bastante diferente daquele realizado pelos filósofos, que tendem a aplicar regras muito mais rigidamente que os cientistas.¹⁶ O conjunto de regras que será aplicado varia, no entanto, de acordo com a escola à qual cada filósofo pertence.

Por exemplo, os filósofos da ciência, desde o tempo dos positivistas lógicos, sempre reforçaram a capacidade das teorias de fazer previsões. Quanto melhor a teoria, mais corretas as previsões que ela permite. Previsão, neste caso, significa previsão lógica: dado que tal e tal constelação de fatores existem, é possível esperar tal e tal resultado. Esse uso da previsão na lógica é diferente do uso cotidiano na palavra “previsão”, que significa poder adivinhar o futuro. Prever o futuro é fazer uma *previsão cronológica*. Muitos autores (inclusive eu mesmo, no passado) confundem esses dois tipos de previsão. A ciência, mesmo as ciências físicas, raramente é

capaz de fazer previsões cronológicas. Por exemplo, nada é tão imprevisível quanto os rumos futuros da evolução. Os dinossauros foram o grupo mais bem-sucedido de vertebrados terrestres no começo do Cretáceo; que eles seriam extintos no final daquele período devido ao impacto de um asteróide era algo imprevisível.

O biólogo, como o físico, também aplica o teste da previsão e procura exceções, mas ele se perturba menos com a falha ocasional da verificação de uma previsão, porque sabe que as regularidades biológicas raramente têm a universalidade das leis da física. A utilidade da previsão no teste de teorias biológicas é extremamente variável. Algumas teorias, em particular as da biologia funcional, têm um valor preditivo alto, enquanto outras são controladas por um conjunto de fatores tão complexo que previsões consistentes não podem ser obtidas. As previsões na biologia são probabilísticas na melhor das hipóteses, devido à grande variabilidade da maioria dos fenômenos biológicos e à ocorrência de contingências e à multiplicidade de fatores em interação que afetam o curso dos eventos. Para o biólogo, não é tão importante que sua teoria sobreviva ao teste da previsão; é mais importante que ela seja útil para resolver problemas.¹⁷

Nas ciências funcionais, as teorias são mais bem testadas com o auxílio de experimentos. Mas, nas ciências nas quais os experimentos não são possíveis e a previsão tem valor limitado para o teste de determinada hipótese — e este é frequentemente o caso nas ciências históricas —, observações adicionais tornam-se necessárias. Por exemplo, a teoria da origem comum afirma que animais e plantas de períodos geológicos mais recentes são descendentes de animais e plantas de períodos geológicos mais antigos. As girafas e os elefantes, por exemplo, descendem de táxons do Terciário Inferior. A teoria da origem comum seria desacreditada se alguém encontrasse elefantes e girafas fósseis no Cretáceo Inferior. Da mesma forma, os dinossauros se originaram na era mesozóica,

e portanto seria uma contradição à origem comum se fósseis de dinossauro fossem encontrados no Paleozóico.

Outra forma de testar uma teoria é usar um conjunto de fatos inteiramente diferente. Por exemplo, se com base em evidências morfológicas construo uma árvore filogenética de um dado grupo de organismos, posso usar um entre vários tipos de evidência molecular (bioquímica) para construir uma filogenia independente e, então, testar o grau de congruência de ambas as árvores. Quando houver desacordo entre as duas, será preciso usar evidências independentes adicionais para saná-lo. Em biogeografia, teorias sobre ligações terrestres no passado ou sobre as capacidades de dispersão de diferentes táxons podem ser testadas de várias maneiras, e teorias biogeográficas podem assim ser refutadas ou fortalecidas. Para provar que os dinossauros se extinguíram completamente no final do Cretáceo, depósitos terciários adicionais precisariam ser examinados em partes remotas do planeta. A natureza das observações e dos testes exigidos varia de um problema para o outro, embora os especialistas geralmente estejam de acordo em grande medida sobre quais testes devam ser considerados válidos em um dado campo.

O BIÓLOGO PRATICANTE

Nenhuma das muitas filosofias da ciência propostas neste século — baseadas como estavam em leis e lógica — se adequava ao desenvolvimento de teorias em biologia evolutiva. Ao se dar conta disso, Popper concluiu, em 1974, que não só o método científico prescrito é falho, como também “que o darwinismo não é uma teoria científica passível de teste, mas um programa de pesquisas metafísico”. Outros filósofos, também com formação em física e matemática, produziram enunciados semelhantes. Popper

se converteu alguns anos mais tarde, e a filosofia do empirismo lógico, depois de ter predominado por quarenta anos, foi abandonada devido às críticas de Kuhn, Lakatos, Beatty, Laudan, Feyerabend e outros filósofos. A longo prazo, a única coisa que o empirismo lógico conseguiu fazer pelas ciências da vida foi alimentar entre os biólogos a desconfiança em relação à filosofia da ciência.

Mesmo assim, o biólogo médio não me parece particularmente preocupado em nenhum momento com o estado das coisas na filosofia da ciência. Quando, nos anos 1950 e 1960, Popper era a grande sensação, todo biólogo que eu conhecia insistia em que era popperiano, e então fazia tudo que lhe desse na telha. Rótulos são politicamente convenientes às vezes, mas em geral não significam nada. (Essa situação me faz lembrar a história do pai que tinha dois filhos gêmeos idênticos, que nunca conseguia distinguir. Ele mandou um para Harvard e outro para Yale. Após quatro anos, o garoto de Harvard se tornou um refinado brâmane de Boston,* enquanto o rapaz de Yale se tornou um típico buldogue de Yale — e, mesmo assim, o pai não conseguia distingui-los.)

O biólogo, no exercício da profissão, não se pergunta se deveria seguir a bula desta ou daquela escola de filosofia. Quando estudamos a história de várias teorias da ciência, começamos a simpatizar com Feyerabend (1975), que disse: “Qualquer coisa serve”. De fato, essa atitude parece ser o que guia o biólogo na maior parte de suas elaborações teóricas. Ele faz o que François Jacob (1977) — em relação à seleção natural — chamou de “fuçar”. Usa qualquer método disponível que o leve de forma mais conveniente à resolução de seu problema.

* No original, *Boston Brahmin*, expressão usada para definir membros da elite cultural e social formada especialmente pelas famílias tradicionais da Nova Inglaterra. (N. T.)

Cinco estágios da explicação

Na biologia — em que o acaso, o pluralismo, a história e a singularidade de eventos desempenham papéis tão importantes (ver o capítulo 4) —, um sistema flexível de construção e teste de teorias parece mais apropriado do que a adoção de princípios rígidos. Tal sistema poderia ser resumido em cinco palavras. (1) Os cientistas fazem *observações* sobre a natureza ou durante experimentos direcionados de forma específica, algumas das quais não podem ser explicadas pelas teorias vigentes ou entram em conflito com as visões geralmente adotadas. (2) Essas observações levam o cientista a formular *perguntas* do tipo “Como?” e “Por quê?”. (3) Para responder a essas perguntas, o pesquisador constrói uma tentativa de *conjectura*, ou uma hipótese de trabalho. (4) Para determinar se essa conjectura está correta, ele a submete a um *teste* rigoroso, que fortalecerá ou enfraquecerá a probabilidade de que ela seja válida; o teste consiste em fazer observações adicionais, de preferência usando diferentes estratégias ou atalhos, bem como experimentos cuidadosamente desenhados. (5) A *explicação* finalmente adotada será a conjectura que foi testada com o maior sucesso durante todo esse processo.

O realismo do senso comum

Os filósofos sempre especularam sobre se há um mundo real lá fora, como indicam os estímulos que recebemos pelos nossos órgãos dos sentidos, e se esse mundo é exatamente como nos informam nossos órgãos dos sentidos e a ciência. Uma visão extrema é representada pela sugestão do bispo Berkeley de que o mundo exterior é simplesmente uma projeção que sai de nós.¹⁸ Os biólogos que conheço são realistas do senso comum. Eles aceitam o fato de que existe um “mundo real” fora de nós. Temos hoje muitas

maneiras de testar as impressões dos nossos sentidos por meio de instrumentos, e as previsões baseadas em tais observações se verificam tão invariavelmente que pareceria pouco vantajoso desafiar o realismo pragmático ou do senso comum, com base no qual os biólogos normalmente fazem suas pesquisas.

O senso comum não é uma ferramenta muito em voga entre os filósofos, que preferem confiar na lógica. Para um não-lógico, por outro lado, os silogismos, em sua maioria, parecem equações virtualmente idênticas. Ele se sente mais confortável com o senso comum. A abordagem rigorosa do lógico pode ter sido adequada em um mundo determinista e essencialista, governado por leis universais, mas parece menos apropriada em um mundo governado por contingências e pelo acaso, um mundo no qual se é sempre convocado a explicar fenômenos únicos. Corvos brancos, malhados e marrons, assim como cisnes negros e cisnes de pescoço negro (todos eles existem!) não são um bom testemunho da superioridade da lógica.

A linguagem da ciência

Cada ramo da ciência tem a sua própria terminologia para os fatos, processos e conceitos de seu campo. Quando um termo se refere a um objeto ou indivíduo — mitocôndrias, cromossomos, núcleo, lobo-cinzento, besouro japonês, sequóia chinesa —, não há problema algum. Mas uma grande classe de termos se refere a fenômenos ou processos mais heterogêneos: competição, evolução, espécie, adaptação, nicho, hibridação e variedade são alguns dos termos encontrados na biologia. Quando esses termos são compreendidos exatamente do mesmo jeito por todos os pesquisadores, eles são úteis e, de fato, necessários.¹⁹ Porém, como mostra a história da ciência, esse nem sempre é o caso, e o resultado é incompreensão e controvérsia.

O cientista se depara com três tipos de problema com a linguagem. Primeiro, o significado de um termo pode mudar à medida que nosso conhecimento do assunto cresce. Termos como força, campo, calor e assim por diante, usados na física moderna, têm sentidos bem diferentes hoje do que em períodos anteriores. O complexo gene do biólogo molecular moderno, com suas seqüências, éxons, íntrons e outras elaborações, é radicalmente diferente da noção primitiva de “contas de colar” e mesmo do conceito mais sofisticado de H. J. Muller; ainda assim, o termo “gene”, originalmente introduzido por Johannsen em 1909, ainda é usado para descrever essa entidade. Uma vez que todos os termos científicos sofrem certa quantidade de mudanças, seria muito confuso introduzir um novo termo a cada alteração sutil em seu significado; novos termos devem ser reservados para mudanças realmente drásticas. Com efeito, termos técnicos precisam ter um razoável grau de “abertura” de modo a permitir a incorporação de descobertas posteriores.

O segundo problema para o cientista é que alguns termos foram involuntariamente transferidos de um dado fenômeno ou processo para outro inteiramente diferente. Isso está bem ilustrado na aplicação, por T. H. Morgan, do termo “mutação”, introduzido por Hugo DeVries, para qualquer mudança repentina no material genético; para DeVries, uma mutação era uma mudança evolutiva capaz de instantaneamente produzir uma espécie nova. Era mais um termo evolutivo do que um conceito genético. Os geneticistas levaram de trinta a quarenta anos para entender que as mutações de Morgan não eram a mesma coisa que as mutações de DeVries.²⁰ Um princípio básico da linguagem da ciência é que um termo usado de forma mais ou menos universal para designar uma entidade não deve ser transferido para uma entidade diferente. A violação desse princípio leva invariavelmente a confusão.

Talvez mais freqüente e mais confuso seja o uso de um mesmo termo para vários fenômenos diferentes. Em boa parte da

literatura filosófica, muita sofisticação lógica é empregada na análise de certos termos, mas uma atenção surpreendentemente escassa é dada à possível heterogeneidade básica de um mesmo termo.²¹ Exemplos são “teleológico”, um termo que pode ser aplicado a pelo menos quatro processos; “grupo” (como em seleção de grupo), que, de novo, se refere a quatro tipos diferentes de fenômeno; “evolução”, que tem sido aplicado a três processos e conceitos muito diferentes; e “darwinismo”, um termo cujo sentido tem mudado continuamente.²²

A ambigüidade terminológica tem tido conseqüências graves de tempos em tempos na história da biologia. A falha de Darwin em se dar conta de que o termo “variedade” era usado de forma diferente por zoólogos e botânicos fez com que ele se confundisse com a natureza das espécies e da especiação.²³ Sina parecida se abateu sobre Gregor Mendel. Ele estava inseguro a respeito dos tipos de ervilha que cruzou e, como a maioria dos melhoradores de plantas, chamou os heterozigotos de “híbridos”. Quando tentou confirmar as leis que descobrira usando “outros” híbridos — que eram, na verdade, híbridos reais de espécies —, ele fracassou. O uso do mesmo termo, “híbrido”, para dois fenômenos biológicos totalmente diferentes atrapalhou seus esforços posteriores de pesquisa.²⁴

A solução mais prática para essa homonímia é, de longe, a adoção de termos diferentes para itens diferentes. E, sempre que a possibilidade de equívocos existir, definições precisas de cada termo em questão precisam ser propostas. Se o conceito ou fenômeno designado mudar de significado, a definição precisa ser revista apropriadamente. As definições para a maioria dos termos usados em ciência são continuamente modificadas, à medida que o nosso conhecimento avança. Quase todos os termos básicos nas ciências físicas, por exemplo, têm sido redefinidos repetidas vezes.²⁵

A maioria dos filósofos parece relutar bastante em fornecer definições, e talvez isso responda por muitos dos equívocos pre-

sentes na literatura filosófica. A razão para tal relutância é que o termo “definição” na literatura filosófica clássica tinha um sentido específico, que era uma reminiscência da tradição escolástica e se baseava nos princípios do essencialismo.²⁶ Parece que muitos filósofos usaram o termo “explicação” para aquilo que os cientistas chamam de definição.

Para mim, a necessidade de definições claras é tão óbvia que nunca consegui entender por que tantos filósofos se opuseram a dar definições. Popper, um dos mais tenazes opositores de definições, revelou em sua *Autobiografia intelectual* (1974) por que adotava essa visão. Disse ter aprendido na juventude que “nunca se deve discutir sobre as palavras e seu significado, porque tais discussões são capciosas e insignificantes”. Ele ficou atônito ao descobrir, em leituras feitas na maturidade, “que a crença na importância dos significados das palavras, especialmente nas definições, era quase universal”. Isso, ele diz, era evidentemente produto do poder do essencialismo. Quando Popper leu Spinoza, achou seus escritos “cheios de definições que me parecem arbitrárias, sem sentido e questionáveis”. Popper, aqui, revela aquilo a que se opunha. Era ao jogo dos lógicos de propor definições para palavras e depois operar em silogismos com elas.²⁷

O que Popper ignorou foi que, quando um cientista demanda uma definição clara, ele está falando de algo inteiramente diferente. O que o cientista demanda é uma eliminação de equívocos. Se avanços científicos posteriores mostrarem que a definição de um conceito ou processo é incompleta ou errônea, a definição deve mudar e será mudada. Sem definições claras em todos os momentos, no entanto, nenhum progresso no esclarecimento de conceitos e teorias é possível. Como cientista praticante, sinto que os filósofos deveriam desistir de sua antipatia por definições e testar, por meio de definições precisas, se os termos que eles usam se referem a um assunto único ou a uma mistura heterogênea. Isso

poria um fim a um número considerável de controvérsias na literatura filosófica.²⁸

DEFININDO FATOS, TEORIAS, LEIS E CONCEITOS

Uma discussão filosófica bem grande se desenvolveu em torno do significado de termos como hipótese, conjectura, teoria, fato e lei. Por exemplo, os filósofos insistem em distinguir entre uma hipótese e uma teoria, mas não conheço nenhuma definição de teoria que permita sempre uma demarcação tão nítida, sobretudo nas ciências da vida. Em todo caso, o cientista no campo ou na bancada do laboratório geralmente não é tão preciso no uso desses termos quanto poderia desejar um filósofo em sua escrivaninha. Sempre que um cientista tem uma iluminação, ele pode dizer: “Acabo de descobrir (ou inventar) uma nova teoria”, quando o que ele realmente está descrevendo é o que poderia ser considerado por um filósofo uma conjectura ou uma hipótese.

Outro termo que se tornou extremamente popular nos últimos tempos é “modelo”. Até onde sei, ele não foi usado nem uma vez em toda a literatura científica sobre a evolução antes dos últimos vinte anos, mais ou menos. Como exatamente um modelo difere de uma hipótese de trabalho? Um modelo precisa ser matemático? Como ele difere de um algoritmo? Faço deliberadamente perguntas “estúpidas” como essas para indicar a necessidade de mais explicação por parte dos filósofos. Todos esses termos — conjectura, hipótese, modelo, algoritmo, teoria — são usados às vezes de forma intercambiável pelos cientistas na formulação de suas explicações. (O leitor esteja avisado de que também uso frequentemente a palavra “teoria” nesse sentido mais livre.)

Fatos versus teorias

Uma teoria, para ser séria, precisa ter uma base factual. Mas onde traçar a linha entre uma teoria e um fato? Quando é que uma teoria universalmente apoiada e repetidamente verificada pode ser considerada um fato? Por exemplo, um evolucionista moderno poderia dizer que a teoria da evolução é hoje um fato. Num sentido estrito, é claro, uma teoria nunca é convertida num fato; em vez disso, ela é substituída por um fato. Quando os planetas externos Urano e Netuno mostraram irregularidades em suas órbitas, a teoria proposta foi que havia um nono planeta, e no tempo devido Plutão foi de fato descoberto. Naquele momento, a existência de Plutão não era mais uma teoria — passava a ser um fato. Da mesma forma, depois que a estrutura do DNA foi descoberta e seu controle sobre a síntese de proteínas foi estabelecido, foram propostas teorias sobre o código que controla a correta tradução da informação no DNA. Rapidamente uma dessas teorias se provou a correta, e o hoje aceito código genético não é mais considerado uma teoria, mas simplesmente um fato. Em 1859, as idéias de Darwin sobre a inconstância das espécies e sobre a origem comum eram consideradas teorias. A quantidade de evidências em favor dessas “teorias” e a ausência de qualquer contra-evidência têm desde então levado os biólogos a aceitar essas teorias como fatos.

Os fatos, portanto, podem ser definidos como propostas empíricas (teorias) que têm sido repetidamente confirmadas e nunca refutadas. As teorias que ainda não foram convertidas em ou substituídas por fatos são, de qualquer forma, aparatos heurísticos úteis, particularmente nas áreas da ciência onde os órgãos dos sentidos são insuficientes, como no reino microscópico e no bioquímico ou em ciências (como a cosmologia e a biologia evolutiva) que constroem narrativas históricas para explicar eventos passados.

Qual é a relação de teorias e fatos com leis universais? As leis se referem a processos com resultado previsível, mas muitas das leis da física, como a da gravidade ou as da termodinâmica, poderiam também ser consideradas simplesmente fatos. Que as aves têm penas, embora seja algo universalmente verdadeiro, é simplesmente um fato, não uma lei.

Aqueles que têm as leis naturais em alta estima pensam sobretudo na regularidade da natureza. Nossas agendas humanas são baseadas nas regularidades da natureza. Sabemos que o verão será seguido pelo inverno e que a cada ano as árvores ganharão um novo anel de crescimento. O uniformitarismo de Lyell se baseava em observações desse tipo. É esperado que o que aconteceu no passado vá acontecer hoje e no futuro. Quando os físicos queriam defender a certeza de suas teorias, eles apontavam que as teorias na física são baseadas em leis universais que não têm exceções nem se restringem no espaço e no tempo.

Regularidades são abundantes no mundo vivo também, mas, em sua maioria, não são universais, nem sem exceção; elas são probabilísticas e muito restritas no espaço e no tempo. Smart (1963), Beatty (1995) e outros filósofos têm sustentado que há poucas leis universais, se há alguma, na biologia. É claro que, no nível molecular, muitas das leis da química e da física são igualmente válidas para os sistemas biológicos, e essas leis permeiam a biologia. Mas poucas regularidades observadas nos sistemas complexos, se alguma, satisfazem a rigorosa definição de lei adotada por físicos e filósofos.

Na maior parte do tempo, os biólogos usam a palavra “lei” apenas para se referir a um enunciado lógico geral que é direta ou indiretamente aberto a confirmação ou falseamento observacional, e que pode ser empregado em explicações e previsões. Tais “leis” são os constituintes básicos de qualquer análise ou explica-

ção científica. Mas, se modificarmos o conceito de “lei” de modo a torná-lo aplicável a qualquer regularidade ou generalização na biologia, então sua utilidade na construção de teorias se torna questionável. Teorias probabilísticas, baseadas nessas assim chamadas leis, raramente são capazes de fornecer o tipo de certeza que se tem em mente quando se usa a palavra “lei”.

Conceitos nas ciências da vida

Os conceitos na biologia têm um papel muito maior que o das leis na formação de teorias. As duas maiores contribuições para a constituição de uma teoria nas ciências da vida vêm da descoberta de novos fatos (observações) e do desenvolvimento de novos conceitos. Quando vamos a um dicionário à procura do significado do termo “conceito”, obtemos uma definição muito ampla. Um conceito pode ser qualquer imagem mental. De acordo com essa definição, o número 3, quando penso nele, é um conceito, e também o são todos os outros números; cada objeto do qual sou capaz de formar uma imagem mental é um conceito. Mas, quando um estudioso das idéias fala de conceitos, ele aplica uma definição muito mais estrita, e mesmo assim parece não haver uma boa definição de “conceito” nesse sentido mais estrito. Ainda assim, um biólogo praticamente nunca tem dúvidas sobre quão importantes são os conceitos nesse campo. Na biologia evolutiva, por exemplo, eles incluem seleção, escolha da fêmea, território, competição, altruísmo, biopopulação e muitos outros.

Os conceitos, é claro, não estão restritos à biologia; eles também ocorrem nas ciências físicas. O que Gerald Holton (1973) chamou de “themata” é aparentemente o que os biólogos chamam de conceitos. Tenho a impressão, no entanto, de que o número de conceitos básicos é bastante limitado nas ciências físicas e em campos como a biologia funcional ou a fisiologia, nos quais a descoberta de

novos fatos é muito importante. Com efeito, alguns líderes nesses campos têm dado declarações indicando que assumem que todo progresso em sua ciência se deve à descoberta de novos fatos. Na maioria das ciências biológicas, por outro lado, os conceitos têm um papel de destaque. Nem todo conceito tem um impacto tão revolucionário como teve a seleção natural na biologia evolutiva, mas os avanços mais recentes nas ciências biológicas mais complexas (ecologia, ecologia comportamental, biologia evolutiva) se devem à proposta de novos conceitos.

A filosofia da ciência clássica faz referências curiosamente raras à importância dos conceitos para a formação de teorias. Quanto mais estudo a formação de teorias, no entanto, mais me impressiono com o fato de que as teorias nas ciências físicas são geralmente baseadas em leis, e na biologia, em conceitos. É possível tentar suavizar esse aparente contraste dizendo que os conceitos podem ser formulados como leis, e as leis podem ser enunciadas como conceitos. Mas, quando os termos “lei” e “conceito” são definidos com rigor, essa transformação tende a enfrentar dificuldades. Esta é uma área problemática, que a filosofia da ciência, com seu foco na física, tem negligenciado.

No próximo capítulo olharemos mais de perto para os fatores únicos que os biólogos precisam levar em consideração quando formulam e testam suas explicações do mundo vivo.

4. Como a biologia explica o mundo vivo?

Quando um biólogo tenta responder a uma pergunta sobre uma ocorrência singular, como “Por que não há beija-flores no Velho Mundo?” ou “Onde se originou o *Homo sapiens*?”, ele não pode se apoiar em leis universais. O biólogo tem de estudar todos os fatos relacionados com aquele problema em particular, inferir toda sorte de consequências a partir da reconstrução de uma miríade de fatores e, então, tentar construir um cenário que possa explicar os fatos observados naquele caso particular. Em outras palavras, ele constrói uma narrativa histórica.

Uma vez que essa abordagem é tão fundamentalmente diferente de explicações que envolvem leis causais, os filósofos da ciência clássicos — advindos dos ramos da lógica, da matemática e das ciências físicas — sempre a consideraram inadmissível. No entanto, autores recentes têm refutado vigorosamente a estreiteza da visão clássica e mostrado não só que a abordagem da narrativa histórica é válida como também que ela talvez seja a única abordagem científica e filosoficamente válida para explicar ocorrências únicas.¹

É claro que nunca é possível provar categoricamente que uma narrativa histórica é “verdadeira”. Quanto mais complexo é o sistema no qual se insere determinada ciência, mais interações existem dentro desse sistema, e tais interações muito frequentemente não podem ser determinadas por observação; podem apenas ser inferidas. A natureza dessas inferências provavelmente dependerá da formação e das experiências prévias de seu intérprete; e, portanto, não é nenhuma surpresa que controvérsias sobre qual é a “melhor” explicação ocorram com frequência. Mesmo assim, todas as narrativas são abertas a falseamento e podem ser testadas repetidas vezes.

Por exemplo: a extinção dos dinossauros já foi atribuída à ocorrência de uma doença devastadora à qual eles eram particularmente vulneráveis, ou a uma drástica mudança no clima causada por eventos geológicos. Porém, nenhuma dessas explicações era apoiada por evidências críveis, e ambas tiveram outros problemas. Quando, em 1980, a teoria do impacto de asteróide foi proposta por Walter Alvarez e, particularmente, após a descoberta da suposta cratera do impacto em Yucatán, todas as teorias prévias foram abandonadas. Os novos fatos se encaixavam muito bem no cenário.

Entre as ciências para as quais as narrativas históricas têm papel fundamental estão a cosmogonia (o estudo da origem do universo), a geologia, a paleontologia, a biogeografia e outras partes da biologia evolutiva. Todos esses campos são caracterizados por fenômenos singulares. Cada espécie viva é única, assim como cada indivíduo, geneticamente falando. Mas a singularidade não é limitada ao mundo vivo. Na Terra, cada sistema fluvial e cada cadeia de montanhas têm também características únicas.

Fenômenos singulares há muito frustram os filósofos. Hume notou que “a ciência não pode dizer qualquer coisa satisfatória sobre qualquer fenômeno genuinamente único”. Ele estava correto, se o que tinha em mente era que eventos únicos não podem ser completamente explicados por leis causais. No entanto, se

ampliarmos a metodologia da ciência de modo a incluir narrativas históricas, com frequência conseguimos explicar eventos únicos de forma bastante satisfatória, e algumas vezes até fazer previsões passíveis de teste.²

A razão pela qual as narrativas históricas têm valor explicativo é que eventos anteriores na sequência histórica geralmente dão uma contribuição causal a eventos posteriores. Por exemplo, a extinção dos dinossauros no Cretáceo tornou vagos diversos nichos ecológicos e, assim, preparou o cenário para a irradiação espetacular dos mamíferos durante o Paleoceno e o Eoceno, devido à invasão desses nichos vagos. O objetivo mais importante da narrativa histórica é descobrir os fatores causais que contribuíram para a ocorrência de eventos posteriores em uma sequência histórica. O estabelecimento de narrativas históricas não significa de forma alguma o abandono da causalidade, mas trata-se de uma causalidade particular, à qual se chega de forma estritamente empírica. Não se relaciona com nenhuma lei; em vez disso, explica um caso simples e único.³

A CAUSAÇÃO NA BIOLOGIA

Uma explicação científica é com frequência considerada válida se se basear na descoberta da causa de um fenômeno observado, particularmente se esse fenômeno for inesperado.⁴ A causalidade em interações simples é, em geral, altamente preditiva. Nesses casos — por exemplo, em uma reação química —, uma causa definitiva pode ser apontada com certeza. A maior parte da literatura filosófica que trata da questão da causalidade se baseia em problemas da física, nos quais o efeito de leis como a da gravidade e da termodinâmica pode dar uma resposta clara à pergunta “Qual é a causa de...?”.

No entanto, uma solução simples como essa raramente está disponível na biologia, exceto nos níveis celular e molecular. O problema é particularmente desconcertante sempre que o efeito está no final de toda uma cadeia de eventos. Talvez seja por um resquício de pensamento teleológico que procuremos no começo do processo por uma causa que produza um efeito previsível. Mas, em biologia, essa abordagem em geral não tem sucesso; com efeito, ela é freqüentemente enganosa. Pode ser difícil, se não impossível, destacar a causa em uma interação de sistemas complexos cujo efeito final é o último passo de uma longa reação em cadeia. Aqui precisamos adotar uma forma diferente de pensar.

Uma interação entre dois indivíduos, antes de sua conclusão, passa por uma série de estágios, durante os quais cada um dos protagonistas tem diante de várias opções disponíveis. Qual delas ele escolherá não é algo que esteja estritamente determinado no começo do estágio, mas sim algo que depende de uma série de fatores e contingências. A causalidade estrita usualmente pode ser construída apenas quando a opção escolhida a cada passo da cadeia pode ser olhada em retrospecto. De fato, todo o processo (mesmo seus componentes aleatórios) pode ser julgado causal quando considerado em retrospectiva. Seria possível então dizer, de uma forma algo paradoxal, que a causação em situações complexas é uma reconstrução *a posteriori*, ou, para dizer de outra forma, a causa consiste em uma série de passos que, tomados em conjunto, podem ser considerados a causa.

Causas próximas e últimas

Há mais uma complicação no que diz respeito à causação na biologia. Todo fenômeno ou processo em organismos vivos é o resultado de duas causas separadas, que são chamadas geralmente de causas próximas (funcionais) e causas últimas (evolutivas). Todas as ati-

vidades ou processos que envolvem instruções de um programa são causas próximas. Isso significa, particularmente, a causação de processos fisiológicos, de desenvolvimento e comportamentais que são controlados por programas genéticos e somáticos. Elas são respostas a perguntas do tipo “Como?”. Causas últimas ou evolutivas são aquelas que conduzem à origem de novos programas genéticos ou à modificação de programas existentes — em outras palavras, todas as causas que levam às mudanças ocorridas durante o processo da evolução. Elas são os eventos ou processos passados que mudaram o genótipo. Não podem ser investigadas pelos métodos da química ou da física, mas devem ser reconstruídas por meio de inferências históricas — através do teste das narrativas históricas. Elas são geralmente a resposta às perguntas do tipo “Por quê?”.

É quase sempre possível apontar tanto uma causa próxima quanto uma causa última como explicação para um dado fenômeno biológico. Por exemplo, para a existência do dimorfismo sexual, é possível dar tanto uma explicação fisiológica (hormônios, genes que controlam o sexo) quanto uma evolutiva (seleção sexual, aspectos da evasão dos predadores). Muitas controvérsias famosas na história da biologia surgiram porque uma das partes considerou somente as causações próximas e a outra parte considerou somente as evolutivas. Uma das propriedades especiais do mundo vivo é esse duplo conjunto de causações. No mundo inanimado, em contraste, há apenas um conjunto de causações — aquelas dadas pelas leis naturais (muitas vezes combinadas a processos randômicos).

Pluralismo

Quando se olha com atenção para um problema biológico, pode-se descobrir naturalmente mais de uma explicação causal. Darwin, por exemplo (como veremos no capítulo 9), acreditava

tanto na especiação simpátrica quanto na alopátrica como explicações para a diversidade da vida, na seleção natural e na herança de caracteres adquiridos como explicações para a mudança evolutiva, na herança particulada (reversões) e na herança por mistura. Tamanho pluralismo de crenças apresenta um problema tanto para a verificação quanto para o falseamento. Produzir evidência em favor da seleção natural não necessariamente falsearia a herança de caracteres adquiridos, e falsear a herança de caracteres adquiridos não necessariamente tornaria a seleção a única causa possível da mudança evolutiva.

Curiosamente, o pluralismo na explicação biológica foi apreciado de forma muito melhor pelos velhos naturalistas do que pelos cientistas modernos. Biogeógrafos desde Zimmermann (no século XVIII) entendiam completamente que descontinuidades podiam ser primárias (saltos de dispersão) ou secundárias (vicariância), mas os que defendem a vicariância hoje não apenas agem como se ela fosse a única solução possível, mas também como se eles tivessem sido os primeiros a pensar nela! Alguns entusiastas recentes do equilíbrio pontuado igualmente escrevem como se esta fosse a única teoria possível para a mudança evolutiva, enquanto autores anteriores adotaram soluções plurais. De fato, é bem possível que em biologia a maioria dos fenômenos e processos deva ser explicada por uma pluralidade de teorias. Uma filosofia da ciência que não consegue lidar com o pluralismo não serve para a biologia.

Em biologia, uma pluralidade de fatores causais, combinada com o probabilismo na cadeia de eventos, geralmente torna muito difícil, quando não impossível, determinar a causa de um dado fenômeno. Por exemplo, os organismos encontrados em certa ilha podem tê-la colonizado quando ela ainda era ligada ao continente no passado, ou podem ter chegado num período posterior por dispersão por sobre a água, ou ambos. Qualquer descontinuidade de

distribuição pode se dever a uma quebra secundária de uma área de ocorrência originalmente contínua (vicariância) ou à dispersão ao longo de terreno impróprio. Uma espécie pode ter se extinguido devido à competição com outra espécie, à perseguição de seres humanos, a mudanças no clima, ao impacto de um asteróide ou a uma combinação desses fatores. Em muitos casos, talvez na maior parte deles, não é possível determinar com certeza qual causa particular ou combinação de causas foi responsável por determinado caso de extinção no passado geológico.

Em quase todas as controvérsias clássicas da biologia, os oponentes deixaram de considerar uma terceira alternativa a dois pontos de vista antagônicos. Por exemplo, as explicações reducionistas dos fisicalistas não poderia explicar fenômenos biológicos que não têm equivalente no limitado domínio inorgânico, enquanto as contrapropostas vitalistas eram igualmente deficientes; o organicismo, um terceiro ponto de vista, que combinava o melhor de ambos, acabou prevalecendo (ver o capítulo 1). Na discussão entre acaso e necessidade, a seleção natural emergiu como a terceira solução, que encerrou o debate. E, na velha discussão do pré-formacionismo *versus* a epigênese, a solução acabou sendo o programa genético. Quase todas as controvérsias da biologia que se arrastaram além do tempo necessário acabaram terminando com a rejeição de *ambas* as explicações prévias e a adoção de uma nova.

Probabilismo

Nos tempos do fisicalismo estrito, quando se acreditava que tudo fosse determinado por uma causa identificável, permitir que o resultado de um processo fosse também afetado pelo acaso era considerado anticientífico. Por esse motivo, o processo da seleção natural de Darwin (que, embora não acontecesse por acaso, assumia certa aleatoriedade) foi chamado pelo físico Herschel de “lei da

mixórdia”. Na verdade, já no tempo de Laplace, o papel dos processos estocásticos (aleatórios) era apreciado por alguns cientistas.

A razão pela qual tantas teorias biológicas são probabilísticas é que o resultado é simultaneamente influenciado por vários fatores, muitos dos quais aleatórios, e essa múltipla causação impede que qualquer fator individual seja 100% responsável pelo resultado. Se dizemos que uma dada mutação é aleatória, isso não significa que uma mutação naquele *locus* possa ser qualquer coisa neste mundo, mas simplesmente que ela não se relaciona com nenhuma necessidade atual do organismo ou não é previsível de nenhuma outra forma.

Estudos de caso na explicação biológica

Quando os filósofos da ciência debatem a formulação de teorias científicas, quase todos os estudos de caso citados tratam das ciências físicas. Mesmo assim, como vimos, a explicação na biologia, e mais especificamente na biologia evolutiva, pode ser bem diferente daquela encontrada nas ciências físicas. Assim, poderia ser útil examinar alguns estudos de caso para ilustrar essa diferença mais completamente.⁵

Deixe-me começar com uma situação simples. Membros da família do camelo são encontrados na fauna existente hoje somente na Ásia (e no Norte da África) e na América do Sul. Como é possível explicar um padrão tão descontínuo de distribuição? Louis Agassiz aplicou sua teoria da criação e simplesmente postulou que Deus havia criado os camelídeos duas vezes — os camelos verdadeiros no Velho Mundo e as lhamas na América do Sul. Quando essa sugestão se tornou inaceitável, após 1859, a hipótese proposta foi a de que os camelos deveriam ter existido em algum momento do passado também na América do Norte, tendo se extinguido naquele continente. A paleontologia confirmou essa

conjectura ao encontrar uma rica fauna fóssil de camelos na América do Norte.

Um problema mais difícil, do qual Darwin já tinha consciência, era o da descontinuidade do registro fóssil. Um dos componentes mais importantes do paradigma evolucionista de Darwin era a continuidade. A evolução ocorre por meio de mudanças graduais. No entanto, quando se olhava para a natureza viva, tudo o que se via era descontinuidade. Esta era onipresente sobretudo no registro fóssil. Novas espécies e, o mais importante, tipos inteiramente novos de organismos apareciam de repente no registro fóssil, sem que nenhum intermediário fosse encontrado entre eles e seus supostos ancestrais. É claro que ocasionalmente um “elo perdido” era encontrado, como o *Archaeopteryx* entre as aves e os répteis, mas mesmo esse fóssil estava separado por grandes hiatos de seus ancestrais reptilianos e das aves verdadeiras. Darwin teimosamente (e, como acreditamos hoje, acertadamente) insistiu em que deveria ter havido uma continuidade completa, mas que o registro fóssil era fragmentário demais para demonstrá-la. Sua conclusão não foi amplamente aceita até quase cem anos depois da publicação da *Origem*, em 1859.

Uma contribuição para uma solução foi fornecida pelo meu artigo de 1954 sobre a evolução especiativa. Propus que uma população fundadora isolada periféricamente poderia sofrer uma transição ecológica e uma reestruturação genética consideráveis, tornando-se o ponto de partida ideal para uma nova linhagem filogenética. É altamente improvável, porém, que uma população tão pequena pudesse ser preservada no registro fóssil. Essa teoria da especiação geográfica foi adotada e elaborada por Eldredge e Gould (1972) em sua teoria do equilíbrio pontuado.⁶ O que temos aqui é um salto conceitual marcado, de uma teoria essencialista para uma teoria populacional. Com efeito, minha impressão é de que todos os saltos teóricos mais drásticos na biologia resultam de um salto conceitual.

Em muitos casos, uma causação inteiramente nova pode ser postulada, enquanto o cerne da nova teoria permanece notavelmente similar à velha teoria. Por exemplo, Darwin explicou em 1839 as chamadas “estradas paralelas” de Glen Roy, na Escócia, como sendo antigas praias, atribuindo sua origem a uma drástica elevação do terreno. Tendo encontrado conchas marinhas em grandes altitudes nos Andes, tendo observado a elevação dramática da costa chilena depois de um terremoto e lançando mão de várias outras observações, Darwin não considerou uma grande elevação daquela área na Escócia improvável, especialmente porque não havia nenhuma outra teoria razoável disponível. No entanto, apenas alguns anos depois da publicação de Darwin, Agassiz propôs sua teoria das glaciações, e ficou claro que as estradas paralelas eram o litoral de um lago glacial. Embora o próprio Darwin tenha depois chamado sua interpretação de “um grande fiasco”, ele estava na verdade bem perto da solução correta. A intuição essencial foi que as estradas paralelas eram praias. Antes da proclamação dessa teoria das glaciações, a única maneira de explicar essas linhas litorâneas era considerá-las praias de mar; além disso, elevações maciças no terreno estavam bem estabelecidas na literatura geológica, em especial devido aos escritos do professor de Darwin, Charles Lyell. Explicar as mesmas praias como resultado de atividade glacial não foi realmente uma mudança drástica.

Uma situação similar é encontrada na vasta — e, em muitos aspectos, magnífica — literatura sobre o planejamento [design] produzida pelos teólogos naturais. Era possível converter toda essa literatura ao darwinismo simplesmente substituindo o fator causal explicativo: não foi Deus quem aperfeiçoou o design, mas a ação da seleção natural. É possível encontrar diversos casos semelhantes, nos quais a estrutura essencial de uma teoria foi deixada intocada e só o fator causal foi substituído.

EPISTEMOLOGIA EVOLUTIVA COGNITIVA

Toda a epistemologia diz respeito ao problema daquilo que sabemos e como sabemos. Nos últimos 25 anos, um movimento chamado epistemologia evolutiva (EE) surgiu, promovendo uma suposta nova maneira de enxergar a aquisição de conhecimento. Um de seus representantes se referiu a ela em termos extravagantes, como “uma nova revolução copernicana”, enquanto seus oponentes consideram tal afirmação enganosa e as contribuições da EE, triviais.

O termo EE, na verdade, foi aplicado a dois processos inteiramente diferentes, que chamarei epistemologia evolutiva darwinista (analisada em detalhe no capítulo 5) e epistemologia evolutiva cognitiva. A EE cognitiva reivindica que certas “estruturas” no cérebro, que evoluíram por meio de um processo darwinista de seleção, permitem aos humanos lidar com a realidade do mundo exterior, e que os humanos não poderiam lidar com o seu mundo se não possuíssem tais estruturas. Todos os indivíduos que não possuíam essa capacidade foram cedo ou tarde eliminados sem deixar descendentes.

Os cientistas modernos acham que muitas percepções do “mundo real” são possíveis, e que nossos sentidos humanos dão apenas uma amostra muito limitada das características desse mundo. Os estudiosos dos protozoários (começando por Jennings) nos revelaram como é o mundo para uma criatura de uma célula só. Von Uexküll descreveu muito claramente quão diferente o mundo de um cachorro é do nosso. Hoje sabemos que os seres humanos enxergam apenas uma pequena parcela de comprimentos de onda, representada pelas cores do vermelho ao violeta, dentre um amplo espectro de ondas eletromagnéticas. Sabemos dos raios infravermelhos, que se manifestam no calor, e dos raios ultravioleta. Sabemos que algumas flores têm coloração ultravioleta, que é percebida por abelhas e outros insetos, mas não por nós. Outros animais são

capazes de detectar e reagir à informação magnética, ou ouvir acima e abaixo da gama de sons acessível aos humanos. Sabemos que há um vasto mundo olfativo, a maior parte dele acessível a outros mamíferos e certamente aos insetos, mas não a nós.

O que determinou a seleção desses aspectos particulares do mundo que podem ser percebidos pelo ser humano? A teoria mais plausível é que os ancestrais de todos os organismos conseguiram sobreviver e se reproduzir porque tinham a capacidade de perceber os aspectos do mundo que eram mais relevantes para a sua sobrevivência, e isso, é claro, vale também para a espécie humana. Essa linha de raciocínio sugere que existem muitos “mundos”, dos quais apenas um nos é acessível. A parte do mundo que é importante para os humanos e suas percepções é às vezes chamada de *mundo médio* (mesokosmos), o mundo das dimensões intermediárias. Ele vai das moléculas até a Via Láctea. Abaixo está o mundo das partículas elementares e acima, o mundo transgaláctico do espaço-tempo.

Uma mesa sólida, lembram-nos os físicos, não é, “na realidade”, nem um pouco sólida, mas constitui-se de núcleos atômicos e elétrons que estão bem distantes uns dos outros. A maioria dos biólogos que conheço aceita a realidade dessa explicação e de outras (que vão dos genes e quarks aos quasares, buracos negros e matéria escura até as peculiares relações entre o mundo das partículas subatômicas e o mundo do cosmos ultragaláctico). Esses fenômenos não podem ser percebidos pelos órgãos dos sentidos humanos. O realista científico, como são chamadas às vezes as pessoas que têm essa visão, acredita que o sucesso de uma teoria requer a crença na existência de uma entidade teórica postulada, e que essas entidades teóricas são tão reais quanto aquelas observadas. O realismo científico é compartilhado por todos os cientistas que conheço.

Mas, francamente, em seu dia-a-dia a maioria das pessoas não interpreta uma mesa dessa maneira, e isso inclui a maioria dos fisi-

cos. Além do mais, nenhum avanço na nossa compreensão do mundo menor ou do maior contribui no que quer que seja com a nossa compreensão do mundo médio, o “mundo real” percebido pelos humanos. Embora a instrumentação fornecida pelos físicos e pelos engenheiros tenha aberto as portas para o fascinante mundo subatômico, bem como para o mundo transgaláctico, nenhum desses outros mundos é parte de nosso mundo sensorial normal, e nenhum deles contribui para o nosso realismo do senso comum. E compreendê-los não é essencial para a nossa sobrevivência.

Mas, então, como é possível que tenhamos idéias sobre propriedades universais tão básicas quanto o espaço e o tempo se não somos capazes de percebê-las diretamente? Aqui a filosofia de Kant teve um impacto considerável sobre o pensamento dos epistemólogos. Kant, se o entendo corretamente, acreditava que o cérebro é estruturado de maneira tal que as pessoas já nascem com informações sobre essas propriedades do universo. É preciso lembrar que Kant era um essencialista em boa parte do seu pensamento e que ele tinha a convicção que o mundo variável dos fenômenos era representado em nosso pensamento por um *eidos* para cada classe de fenômenos variáveis, que ele chamou de *Ding an sich* [coisa em si]. Ela existia *a priori*, ou seja, antes de qualquer experiência, portanto antes do nascimento.

Quando Konrad Lorenz ocupou a cadeira de Kant em Königsberg, em 1941, ele desenvolveu uma teoria da epistemologia evolutiva baseada na noção de Kant “de que a percepção e o pensamento do homem têm estruturas funcionais que precedem qualquer experiência individual”. De modo a ser capaz de lidar com o mundo, disse Lorenz, um recém-nascido precisa ter várias estruturas cognitivas no cérebro, da mesma forma como uma baleia recém-nascida tem barbatanas para nadar. Quando nossos ancestrais hominídeos saltaram de uma zona adaptativa para outra, estruturas mentais apropriadas foram selecionadas pelo

mesmíssimo processo que selecionou adaptações estruturais. Essas estruturas inatas de nossa percepção e pensamento, disse Lorenz, são os equivalentes exatos das adaptações morfológicas ou de quaisquer outras. Parece-me que a sugestão de Lorenz é basicamente a mesma que o fato de os olhos surgirem no embrião muito antes de serem usados para ver.⁷ Mesmo os mais primitivos protistas têm um aparato para perceber e responder aos perigos e às oportunidades que encontram em seu habitat. Mais de 1 bilhão de anos de seleção natural elaboraram o programa genético da espécie humana, partindo do de um simples protozoário e chegando ao da humanidade. Assim, a nova compreensão biológica da natureza dos programas genéticos finalmente explicou aquilo que por muito tempo foi um grande mistério para os filósofos.

Acredito que seja preciso aceitar a idéia de que, durante a evolução dos humanos a partir de outros primatas, houve a evolução rápida de um cérebro que era capaz de solucionar problemas mesmo além da capacidade de um chimpanzé. Mas isso ainda deixa sem resposta a seguinte pergunta: “Quão específica é a estruturação do cérebro humano?”

Programas abertos e fechados

Há muito a indicar que, fisicamente, o cérebro humano atingiu sua atual capacidade cerca de 100 mil anos atrás, época em que nossos ancestrais ainda estavam culturalmente em um nível muito primitivo (ver o capítulo 11). O cérebro de 100 mil anos atrás é o mesmo que hoje é capaz de projetar computadores. As atividades mentais altamente especializadas que vemos nos seres humanos hoje não parecem requerer uma estrutura cerebral selecionada *ad hoc*. Todas as conquistas do intelecto humano foram obtidas por um cérebro que não foi selecionado especificamente para essas tarefas por um processo darwinista.

É claro que diferentes capacidades humanas são controladas por diferentes áreas no cérebro. Mas, em vista da nossa ignorância atual sobre o funcionamento do cérebro humano, seria enganoso sermos específicos demais agora em nossas especulações sobre as estruturas do cérebro que permitem a cognição humana e o reconhecimento do mundo. Ainda assim, com base no que sabemos neste momento, parece ser possível reconhecer três tipos de áreas no cérebro.

Primeiro, o cérebro parece conter áreas que são rigidamente programadas desde o começo. Instintos nos animais inferiores, reflexos e padrões de locomoção tanto nos animais inferiores quanto nos superiores são exemplos desses “programas fechados”. Mas não se sabe se comportamentos mais complexos da espécie humana (e quais) pertenceriam a essa categoria. Pesquisas em comportamento e personalidade de bebês indicam que podemos ser mais rigidamente programados do que costumávamos imaginar.⁸

O cérebro também parece conter áreas adequadas a “programas abertos”. Essa informação não é rigidamente programada da forma como são os instintos, mas áreas específicas no cérebro são reservadas para processar tal informação se ela estiver disponível no ambiente do organismo jovem. Muitos componentes do nosso equipamento cognitivo, como a capacidade de aprender línguas ou adotar normas éticas, são aparentemente mais bem adquiridas em certos estágios da infância e não são facilmente deslocadas ou esquecidas, uma vez adquiridas. Essas categorias de aprendizado parecem ter muito em comum com o simples “*imprinting*” dos etólogos. O jovem ganso, durante esse período sensível da infância, é “estampado” pela visão de sua mãe. Esse “objeto-a-ser-seguido” é inserido no cérebro do gansinho, numa área evidentemente pronta para receber essa informação. De forma semelhante, cada nova experiência de um ser humano em desenvolvimento é registrada no espaço cerebral apropriado e reforça experiências

associadas que já haviam sido gravadas no cérebro.⁹ Os componentes do nosso conhecimento do mundo, como descritos por Kant, Lorenz e outros epistemólogos evolutivos, são talvez mais bem compreendidos como programas abertos.

Finalmente, o cérebro parece conter áreas generalizadas que permitem o armazenamento (memória) de toda sorte de informação adquirida ao longo da vida. Hoje não sabemos virtualmente nada a respeito de uma possível subdivisão do cérebro para diferentes categorias dessa informação geral. As memórias de longo e de curto prazo podem ser exemplos dessas subdivisões.

A epistemologia evolutiva cognitiva diz respeito especialmente à segunda classe dessa lista. Ela lida com áreas do cérebro que evoluíram por meio da seleção natural para fornecer ao recém-nascido os programas abertos adequados nos quais ele possa guardar informações cognitivas importantes e específicas. Não há nada de metafísico ou essencialista nessas áreas cerebrais; elas são simplesmente um produto da evolução darwinista. O que ainda é vastamente ignorado é o grau de especificidade dessas áreas. Pareceria provável que muito da sua especificidade é adquirido após o nascimento. Isso é indicado pela relativa facilidade com que, numa criança, muitas funções de grandes áreas destruídas do cérebro podem ser assumidas por outras áreas.

Como tudo isso se soma no tocante à avaliação da EE cognitiva? Concluo que estruturas cerebrais altamente específicas não são necessárias para a percepção e o conhecimento do nosso mundo. No geral, parece que o aprimoramento evolutivo do sistema nervoso central não necessariamente leva a estruturas neurais altamente específicas, e sim a uma estrutura cerebral geral melhorada continuamente. Como resultado, o cérebro não só é capaz de lidar com os reais desafios que se impuseram aos humanos primitivos, mas também tem capacidades, como as necessárias para jogar xadrez, que não foram convocadas na época em que

esses aprimoramentos no cérebro foram selecionados. No geral, me parece que a EE cognitiva não é nada revolucionária, e sim um desenvolvimento natural da aplicação do pensamento evolutivo darwinista à neurologia e à epistemologia.

A BUSCA DA CERTEZA

O objetivo da ciência é geralmente descrito como sendo a busca da verdade, mas o que é verdade? Os oponentes cristãos de Darwin nunca questionaram a verdade de cada palavra escrita na Bíblia, o que os levou à conclusão de que tudo neste mundo fora criado por Deus. O que em eras passadas foi considerado uma heterodoxia ousada, como a noção de que a Terra gira em torno do Sol, hoje é tido como verdade absoluta. Que a Terra é redonda e não chata (como se acreditava), nenhuma pessoa razoável nega hoje. O historiador da ciência sabe quantas “verdades inquestionáveis” de períodos passados subsequenteiramente provaram ser erros. Antes de Kepler, os astrônomos davam por certo que as órbitas de todos os corpos celestes eram círculos perfeitos. Antes de Darwin, a maioria dos filósofos tinha certeza de que as espécies eram imutáveis. Até os anos 1880, era universalmente aceito que as características adquiridas durante a vida podiam ser passadas para a geração seguinte. Nenhum de nós sabe quais são as suposições tácitas da nossa geração que serão finalmente refutadas por avanços científicos futuros.

Que a seqüência de fósseis nos estratos da Terra documenta a evolução é algo hoje aceito pelos cientistas como verdade irrefutável. Mas muitas outras descobertas da ciência ainda são tentativas. Elas podem possuir um razoável grau de certeza, mas não nos espantáramos muito com a sua eventual substituição por uma teoria alternativa, ligeira ou drasticamente revisada. Os cientistas não

mais insistem na “verdade absoluta”. Eles se dão por satisfeitos quando dada teoria sobrevive a todas as tentativas de falseamento e explica tudo o que deveria explicar. Durante séculos, acreditou-se que as equações de Newton fossem a verdade final. Um dia, no entanto, ficou provado pelas teorias da relatividade de Einstein que, sob certas condições, essas equações não são corretas, a despeito de quão adequadas elas sejam em uma situação terrestre normal.

O consenso parece ser que a maior parte das conclusões da ciência é tão bem estabelecida que elas podem ser consideradas certas, enquanto outras conclusões são apenas verdades provisórias com graus variáveis de certeza. Se houver competição entre duas teorias e não se puder estabelecer claramente qual das duas é “mais verdadeira”, Laudan (1977) sugere que se adote a teoria mais bem-sucedida na resolução de problemas, ou a que mais problemas foi capaz de resolver.

A verdade das explicações, no entanto, é geralmente vulnerável. Que as aves adquiriram suas penas assistidas pela seleção natural é uma proposição quase certamente verdadeira, mas, como a maioria das coisas que aconteceram no passado remoto, é algo que provavelmente nunca poderá ser estabelecido de forma inequívoca — ou seja, que não pode ser provado. *Por que* a aquisição de penas seria uma vantagem seletiva é algo ainda mais difícil de provar: foi para proteger esses vertebrados de sangue quente contra o frio ou para protegê-los contra o excesso de radiação solar?¹⁰

Há observações ainda totalmente inexplicadas em todos os ramos da ciência. Por que o fenótipo de certos invertebrados (sobretudo os chamados fósseis vivos) permaneceu virtualmente imutável por mais de 100 milhões de anos, enquanto seus associados nas mesmas faunas ou se extinguíram ou evoluíram drasticamente? Por que dois tipos de ave parecem ser igualmente bem-sucedidos, quando em um deles o macho participa ativamente da criação dos filhotes e no outro não? (A resposta pode estar naquilo

que os filhotes comem, se insetos ou frutas.) O número de enigmas desse tipo era muito maior cinquenta ou cem anos atrás, e nesse meio-tempo uma porcentagem notável desses casos foi explicada satisfatoriamente — por exemplo, por que os membros de uma casta estéril de insetos sociais participam com tamanha devoção da criação da prole da rainha.¹¹ A bioquímica foi capaz de elucidar a natureza de quase todos os enigmas fisiológicos. Os mistérios mais importantes que restam dizem respeito à explicação dos processos mais complexos da vida orgânica, o desenvolvimento do óvulo fertilizado até o estágio adulto e o funcionamento do sistema nervoso central. A maioria dos processos individuais nesses dois importantes campos é razoavelmente bem entendida, mas a explicação da integração dos processos individuais e de seu controle ainda está um pouquinho além da nossa compreensão.

À luz dessas incertezas remanescentes, alguns não-cientistas chegaram ao extremo de dizer que nada descoberto pela ciência possui qualquer grau de certeza. E mesmo alguns filósofos têm questionado se algum dia encontraremos a verdade final sobre o que quer que seja. Essa incerteza levou à questão que consideraremos no capítulo 5: “A ciência avança?”.

5. A ciência avança?

Praticamente todos os cientistas e, com efeito, a maioria dos leigos que se interessam por ciência têm a convicção de que estamos avançando constantemente em nossa compreensão da natureza, à medida que sucessivas gerações de cientistas completam mais e mais lacunas na “verdadeira” história de como o mundo funciona. De acordo com essa visão, pode haver algumas perguntas às quais jamais conseguiremos responder (“Por que nosso mundo existe?”, “Por que ele é como é?”), mas em cada ramo da ciência há um vasto número de questões que parecem acessíveis a futuras pesquisas.

Essa convicção de que a ciência avançou e continuará avançando, no entanto, não é partilhada por todos. Durante os últimos cinquenta anos, o salto na filosofia da ciência do determinismo estrito e da crença em uma verdade absoluta para uma posição na qual somente uma *aproximação* da verdade (ou suposta verdade) é reconhecida tem sido interpretado por alguns comentaristas como uma evidência de que a ciência não avança. Isso levou o movimento anticiência a argumentar que a ciência é uma perda de tempo porque não leva a nenhuma verdade final sobre o mundo à nossa volta.

Quando lemos a literatura biológica corrente, podemos talvez entender como uma visão tão negativa pode ter surgido. Para um observador externo, as controvérsias aparentemente sem resolução que cercam os equilíbrios pontuados, o papel da competição nos ecossistemas e a dispersão na biogeografia, o controle da diversidade biológica, o programa adaptacionista e a definição de espécie (para citar apenas algumas das questões que serão discutidas nos capítulos seguintes) poderiam facilmente levar à conclusão de que não há consenso à vista, portanto não há esperança de qualquer progresso real. Mesmo alguns cientistas acreditam que possamos estar chegando ao limite das questões que podem ser respondidas pela ciência.¹

Na filosofia da ciência, encontramos uma objeção disseminada à noção de progresso científico, ao qual Kitcher (1993) chamou de “a Lenda”. De acordo com a Lenda, a ciência tem tido muito sucesso em chegar aos “objetivos da ciência [...]”. Sucessivas gerações de cientistas têm completado mais e mais partes da verdadeira história do mundo [...]. Os paladinos da Lenda [...] viram uma tendência geral a uma [...] aproximação cada vez melhor da verdade”. Minha confissão de que sou adepto da Lenda sem dúvida fará com que esses críticos me considerem fora de moda. Mas o que quero saber é: de que ciência esses críticos estão falando? Devo admitir que os avanços nas ciências que conheço se encaixam notavelmente bem na Lenda.

Por exemplo, a história da geologia, desde Werner e Lyell até a moderna tectônica de placas, tomada em conjunto com a história da evolução orgânica desde Lamarck até a síntese evolucionista dos anos 1940, pode certamente ser considerada um progresso em relação à crença anterior em um mundo imutável. A progressão de Ptolomeu a Copérnico, Kepler, Newton até a moderna astrofísica é uma história de aprimoramento contínuo em nossa compreensão do cosmos. As mudanças no pensamento científico, de Aristó-

teles a Galileu, Einstein e a mecânica quântica são outra saga de avanço científico.

Séries similares de estágios progressivos podem ser citadas para a morfologia, a fisiologia, a sistemática, a biologia comportamental e a ecologia. O desenvolvimento da biologia molecular, desde a década de 1940, tem sido uma seqüência ininterrupta de sucessos. Onde não havia virtualmente nada antes da década de 1940, hoje temos uma bem estabelecida megaciência. Todos os principais avanços na medicina se baseiam em avanços na biologia ou outras ciências básicas. Eu poderia pegar um problema após o outro na biologia e mostrar como sucessivas teorias têm se tornado mais e mais eficientes para explicar os fatos conhecidos.

Mas o que exatamente queremos dizer com os termos “avanço da ciência” ou “progresso científico”? Queremos dizer com eles que novas teorias se estabelecem e que essas teorias explicam as coisas mais e melhor que as anteriores, além de serem menos vulneráveis à refutação. Na maioria das ciências, teorias melhores permitem predições melhores, e estão menos sujeitas a serem substituídas por outras conjecturas. Qual das duas ou mais teorias é a “melhor” é muitas vezes exatamente a questão em uma controvérsia científica. A história da ciência mostra, no entanto, que no seu devido tempo as controvérsias em torno de determinado problema são de alguma forma resolvidas, e finalmente uma das teorias é reconhecida como sendo melhor que suas concorrentes. A resolução de muitas controvérsias históricas acabou sendo a rejeição de *ambas* as teorias que se opunham então e sua substituição por uma terceira.

Muito freqüentemente, uma teoria se torna tão bem-sucedida a ponto de ficar sem quaisquer concorrentes. No entanto, o fato de que determinada teoria em determinada época seja a única explicação para um processo ou um fenômeno qualquer não significa necessariamente que ela seja a palavra final. O grande número de

teorias que foram um dia universalmente aceitas mas foram em seguida tão duramente refutadas que hoje são consideradas inválidas é mais uma evidência do progresso científico. Algumas das mais conhecidas dentre literalmente centenas de teorias desse tipo poderiam ser mencionadas: a teoria de Schwann da origem de novas células a partir do núcleo, a herança por mistura, a relação quinária dos táxons, a herança de caracteres adquiridos e inúmeras teorias em fisiologia. Essas teorias, hoje refutadas, eram, quando foram propostas, a melhor explicação possível na época, baseadas na informação existente então e no arcabouço conceitual do campo. Mas os cientistas raramente estão satisfeitos com uma teoria, qualquer que seja; eles sempre tentam melhorá-la ou substituí-la por uma melhor ou mais completa. As teorias que tomaram seu lugar resistiram a numerosas tentativas de refutação e são consistentes com a evidência disponível até o momento atual.

Alguns autores, dos quais Charles Darwin talvez seja o mais proeminente, têm um saldo de gols* notavelmente alto para o sucesso de suas teorias. Mas até Darwin propôs teorias que foram mais tarde refutadas. Entre elas está a pangênese e a especiação simpátrica devida ao princípio da divergência. A história da genética ilustra particularmente bem a conclusão de que muito no avanço da ciência consiste na refutação de teorias errôneas.

É claro que nem toda mudança de teoria em ciência é uma evidência de progresso. Com efeito, quando a falecida teoria, proposta nos anos 1890, de que a “nucleína” era o material genético foi abandonada em favor das proteínas, isso se mostrou mais tarde ter sido um passo atrás. O mesmo pode ser dito para as teorias evolutivas tipológicas-saltacionais dos mendelianos (Bateson, DeVries), que rejeitaram o conceito darwinista prevalente de evolução

* No original, *batting average*, termo usado em beisebol para designar o índice de aproveitamento de um batedor pela sua média de acertos. (N. T.)

populacional gradual. A historiografia da biologia está cheia de exemplos semelhantes de retrocessos temporários. O que esses casos nos ensinam é que é um erro abandonar por completo uma teoria aparentemente refutada até que ela tenha sido exaustivamente testada e que se tenha mostrado que ela é inquestionavelmente errônea.

O caminho para novos vislumbres não é, de forma alguma, necessariamente retilíneo. Muitas vezes ele é como a tentativa de mirar num alvo, uma aproximação em ziguezague que faz uso do princípio da aproximação recíproca. Cada nova solução para uma questão científica, grande ou pequena, leva a novas questões; há normalmente um resíduo inexplicado, as chamadas caixas-pretas — presunções algo arbitrárias que ainda precisam de mais análise e explicação. Nesse sentido, nunca haverá um fim da ciência.

Nem todas as atividades que absorvem o tempo e a atenção dos cientistas levarão necessariamente ao avanço da ciência. Em todos os campos existem mentes mais burocráticas, que gostam de preparar listas e outras compilações, que gostam de estabelecer bancos de dados e se ocupar de outras atividades que serão úteis a outros pesquisadores, mas que não fazem o campo progredir de forma perceptível. A maioria dos pesquisadores — talvez por uma boa razão — tem medo de olhar para as grandes questões não resolvidas em seu campo. Em vez disso, essencialmente duplicam o que já foi feito por outros. Por exemplo, eles vão estudar na *Drosophila virilis* o que já foi estabelecido para a *Drosophila melanogaster*. Outros produzem um rico corpo de novos fatos, mas falham em desenvolver quaisquer generalizações a partir deles.

Alguns pesquisadores se restringem a um problema altamente específico e não conseguem estabelecer contato intelectual e sobretudo conceitual com pesquisadores de campos vizinhos. As explicações científicas freqüentemente lançam mão de informações e conceitos de diversas áreas adjacentes, e é comum que um

avanço teórico em uma área possa ter repercussões em várias áreas correlatas. Às vezes o progresso na ciência não se expressa simplesmente pela refutação de uma teoria, mas pela ampliação da base explicativa que une ou sintetiza várias disciplinas científicas.

A maioria dos que atacaram a noção de progresso científico foram filósofos ou outros não-cientistas que simplesmente não estão habilitados a avaliar se houve ou não qualquer progresso real no nosso entendimento. Tudo o que sei sobre ciência me leva a discordar do que afirmam esses críticos. A maioria dos princípios e teorias da ciência moderna tem permanecido inabalada por trinta, cinquenta, cem e, em alguns casos, por mais de duzentos anos. Nossa compreensão básica do mundo é hoje notavelmente robusta.

Há umas poucas grandes exceções, como nosso entendimento do cérebro e da coesão do genótipo, mas é preciso enfatizar que estas são as exceções. Ainda assim, o ceticismo sobre o avanço da ciência ainda é suficientemente disseminado fora da esfera científica a ponto de justificar que se documente mais o progresso contínuo em vários campos da ciência, em especial na biologia. De forma a evidenciar a reivindicação de que o progresso real acontece, detalharei um estudo de caso concreto.

O AVANÇO CIENTÍFICO NA BIOLOGIA CELULAR

A citologia — o estudo científico das células — é particularmente adequada a esse propósito.² Esse campo se tornou possível devido à invenção do microscópio. O primeiro trabalho em citologia foi publicado em 1667 por Robert Hooke, sob o título de *Micrographia*, e nele a palavra “célula” foi usada pela primeira vez. Embora muitos objetos microscópicos tenham sido descritos nos 150 anos subsequentes por três grandes microscopistas, Grew, Malpighi e Leeuwenhoek, o estudo dos objetos microscópicos era

mais entretenimento do que ciência séria. Pouca coisa nova foi descrita de 1740 a 1820. Embora se fizesse referência ocasional às células, as referências pareciam enfatizar mais as fibras e outras estruturas longitudinais do que as células.

Os grandes avanços entre 1820 e 1880 ou 1890 foram possibilitados por aperfeiçoamentos técnicos nas lentes (o mais importante dos quais feito por Abbe) e pela descoberta da imersão em óleo. A iluminação dos objetos também foi constantemente aprimorada, bem como os métodos de fixação de tecidos e de qualquer material vivo e, por fim, pelo uso de todo tipo de corante para produzir contraste entre a parede celular, o citoplasma, o núcleo e as organelas celulares. Algumas das primeiras descobertas mais importantes de investigadores como Brown, Schleiden e Schwann foram feitas com microscópios caseiros, incrivelmente primitivos. No começo do século XIX, no entanto, diversas firmas ópticas começaram a produzir microscópios cada vez melhores, e isso facilitou enormemente o estudo das células e ajudou a popularizar a citologia. A inadequação dos primeiros instrumentos muitas vezes levou a observações errôneas, e esta foi uma das razões para as controvérsias iniciais da citologia.

A maioria das histórias da biologia dá a impressão de que o estudo das células começou com Schleiden e Schwann. No entanto, F. J. F. Meyen (1804-40) publicou antes ainda uma monografia notavelmente correta e bem informada sobre células vegetais.³ Ele descreveu a multiplicação das células por divisão, usou iodo para marcar inclusões de amido em células de planta e deu uma descrição exata dos cloroplastos. Se não tivesse morrido tão jovem, sem dúvida teria tido seu nome honrado na história da biologia. Mas Meyen não estava sozinho; naquele período havia meia dúzia de outros pesquisadores que deram contribuições substanciais à correta descrição das células.

Em novembro de 1831, Robert Brown anunciou a descoberta de um corpo em todas as células, que batizou de núcleo. Mas ele se

absteve de especular sobre o seu significado. Isso foi feito por M. J. Schleiden em um artigo publicado em 1838, no qual ele afirmava que as células se originam a partir do crescimento do núcleo. Então, ele o renomeou como citoblasto. O núcleo em si, afirmou, era formado *de novo* a partir do líquido do conteúdo celular. Evidentemente, essa era uma teoria epigenética da origem das células, adequada a um ambiente intelectual no qual qualquer sugestão de pré-formação era recebida com um franzir de cenho. Mesmo assim, Meyen imediatamente publicou uma réplica a Schleiden, na qual reiterava sua observação da formação de novas células pela divisão de células preexistentes, um processo que para Schleiden supostamente cheirava a pré-formação. Para piorar as coisas para Meyen, várias outras idéias que ele tinha sobre o núcleo celular estavam erradas.

Schleiden, um botânico, tinha feito suas pesquisas citológicas em células vegetais, com suas paredes celulares bem formadas. Ele confirmou uma conclusão à qual essencialmente Meyen já havia chegado: que uma planta não consiste em nada senão células, ainda que algumas delas sejam muito modificadas. Mas e quanto aos animais? Eles também consistem em células? Isso foi demonstrado em 1839 por Theodor Schwann, que conseguiu mostrar, em um tecido animal após o outro, que os componentes desses tecidos, por mais que parecessem diferentes uns dos outros, não eram nada senão células modificadas. Schwann, no entanto, também confirmou, numa investigação bastante detalhada, a teoria errônea de Schleiden de que novas células se originam dos núcleos. Ele apenas acrescentou outro processo, pelo qual os núcleos podiam se originar de material celular não formado.

Poucas publicações na história da biologia causaram tamanha sensação quanto a magnífica monografia de Schwann. Ela demonstrou que animais e plantas são constituídos dos mesmos tijolos básicos — as células — e que, portanto, existe uma unidade

em todo o mundo orgânico. Além disso, a composição celular tanto dos animais quanto das plantas demonstra que as células são os componentes elementares dos organismos. Isso foi um endosso vigoroso ao pensamento reducionista.

Schleiden publicou mais tarde uma apresentação detalhada de sua teoria da ciência com forte ênfase na indução e uma crítica severa às teorias então em voga de Schelling e Hegel. Ainda assim, está bastante claro que Schleiden não era nem de longe tão empírico e indutivo quanto pensava, e suas conclusões finais foram todas teleológicas. Ele claramente baseou sua teoria da ciência em Kant, através de Fries. Uma visão de mundo teleológica similar também era verdade para Schwann, que era um católico devoto.

A teoria de Schleiden-Schwann sobre a origem do núcleo a partir do citoplasma ou outras substâncias orgânicas amorfas se encaixava bem não só no pensamento epigenético dos embriologistas, mas também na teoria da geração espontânea, que ainda era largamente aceita naquela época. É outro exemplo da influência das ideologias na aceitação de teorias. A teoria da possibilidade da formação livre de novos núcleos e células em material orgânico foi minuciosamente refutada por Robert Remak em 1852. Ele mostrou que em um embrião de rã em desenvolvimento, a começar da primeira clivagem, todas as células em todos os tecidos eram resultantes da divisão de uma célula preexistente. Em 1855, ele levou isso adiante com uma monografia maior, bem ilustrada, na qual a teoria de Schleiden-Schwann era ainda mais completamente refutada. Naquele mesmo ano, Virchow adotou as conclusões de Remak e cunhou a famosa máxima *omnis cellula e cellula* ("todas as células [derivam] de células"). Como era de esperar, Virchow também era um oponente determinado da teoria da geração espontânea.

Não é fácil estabelecer o que realmente causou a mudança na teoria da origem das células. Supostamente o aperfeiçoamento dos microscópios e das técnicas de microscopia estava envolvido, bem

como a escolha de Remak de um material particularmente adequado, o embrião de rã. Por outro lado, a nova teoria estava em aparente oposição à epigênese e à teoria da geração espontânea, ambas ainda dominantes na época. Parece, pelo menos neste caso, que as descobertas empíricas simplesmente varreram qualquer apreensão sobre a aparente violação de idéias amplamente difundidas.

Entendendo o núcleo

A nova teoria celular originalmente não tinha função nenhuma para o núcleo, mesmo que Remak tivesse mostrado claramente que a divisão do núcleo precedia a da célula; essa observação foi negada categoricamente por outros, inclusive por Hofmeister, tão pioneiro em outras ocasiões. Em consequência disso, passaram-se trinta anos antes que o slogan *omnis nucleus e nucleo* ("todos os núcleos [derivam] do núcleo") pudesse ser cunhado por Flemming.

Foi realmente o processo de fertilização que no fim das contas deu as pistas mais importantes. Começou com a prova dada por Kölliker (para o óvulo) e por Gegenbaur (para o espermatozóide) de que esses dois elementos reprodutivos são células. Que papel essas células tinham na fertilização e no desenvolvimento, no entanto, era algo muito controverso no início. Para os fisicalistas, a fertilização não era nada mais que um fenômeno físico, que consistia da transmissão da excitação produzida pelo contato do espermatozóide com a célula-ovo. A fertilização, para eles, era simplesmente o sinal que iniciava a clivagem da célula-ovo. Para seus oponentes, era a "mensagem" que o espermatozóide levava ao óvulo o aspecto verdadeiramente significativo da fertilização.

Antes que esta última visão pudesse finalmente triunfar, diversas idéias errôneas sobre o desenvolvimento precisaram ser eliminadas. A mais importante delas era a pré-formação, a crença de que um organismo em miniatura estivesse encapsulado ou no

óvulo ou no espermatozóide. A começar por Blumenbach, essa idéia foi tão impiedosamente ridicularizada que acabou sendo substituída pela teoria da epigênese, a crença de que o desenvolvimento começava com uma massa completamente amorfa que recebia a forma de alguma força externa.

A segunda idéia que precisava ser aceita era a da contribuição igual do óvulo e do espermatozóide para as características do embrião em desenvolvimento — em outras palavras, a consideração dos aspectos genéticos da fertilização. A prova foi dada primeiro por Koelreuter, que nos anos 1760 provou esse ponto de forma conclusiva em seus experimentos com hibridização. Embora o trabalho de Koelreuter tenha sido amplamente ignorado, descobertas semelhantes às suas foram feitas nos anos seguintes por muitos outros, e a idéia de que o espermatozóide tinha um papel muito mais importante do que o de apenas iniciar a clivagem do óvulo fertilizado foi enfim aceita. Incrivelmente, até os anos 1870, Miescher, o descobridor dos ácidos nucleicos, ainda aderiu à interpretação fisicalista.⁴

A entrada do espermatozóide no óvulo, e algumas vezes até a fusão do núcleo masculino com o núcleo do óvulo, havia sido observada repetidas vezes entre os anos 1850 e 1876, mas essas observações eram mal interpretadas, devido ao arcabouço conceitual errôneo do pesquisador. Foi Oskar Hertwig (1876) que mostrou claramente que a fertilização consistia na penetração do espermatozóide no óvulo, que o espermatozóide fornecia um núcleo masculino que se fundia com o núcleo do óvulo e que o desenvolvimento do embrião era iniciado pela divisão de um novo núcleo, o do zigoto, então formado pela fusão dos núcleos masculino e feminino. Essas observações foram totalmente confirmadas e expandidas por H. Fol em 1879.

A idéia — disseminada nas décadas anteriores — de que o núcleo celular era dissolvido antes de cada divisão celular fora agora

claramente refutada, ao menos para o processo de fertilização, e técnicas de microscopia aprimoradas logo demonstraram que toda divisão celular era iniciada pela mitose do núcleo da célula.

O que ainda não era totalmente compreendido naquela época era que a fertilização pelo espermatozóide desempenhava um duplo papel. Ela importava material genético do pai para o óvulo, mas também dava o sinal para o desenvolvimento do zigoto. Que esses são dois papéis inteiramente distintos era algo que os fisicalistas não entendiam. Quando Loeb conseguiu iniciar, por meios químicos, o desenvolvimento de óvulos não-fertilizados, fez afirmações sobre essa partenogênese artificial que deixavam claro que ele ignorava completamente o papel genético da fertilização.

Por volta da década de 1870, estava claro para os principais investigadores da área que a fusão dos núcleos do espermatozóide e do óvulo tinha importância genética. Que importância era essa e como os dois núcleos poderiam transmitir as propriedades genéticas dos pais era algo ainda completamente obscuro. Agora era necessária a descoberta e a correta descrição da divisão reductiva durante a meiose das células germinativas em amadurecimento e a apreciação de que os componentes essenciais do núcleo eram os cromossomos; isso foi feito por Weismann, Van Beneden e Boveri.

Os empiristas, que faziam o excelente trabalho de microscopia, muitas vezes interpretavam erroneamente suas descobertas apenas por não terem o arcabouço teórico apropriado. Frequentemente eles não perguntavam por que uma coisa estava acontecendo. Aqui Roux fez a coisa certa. Ele perguntou, com muita perspicácia: Por que o complexo processo da mitose é necessário? Esse processo gasta um tempo enorme e é de uma complexidade aparentemente desnecessária. Por que não se pode apenas dividir o núcleo ao meio e dar metade para uma célula-filha e metade para a outra? Roux corretamente concluiu que a complexidade do processo de mitose se justifica apenas se o material nuclear for alta-

mente heterogêneo e se for preciso um método para certificar que cada célula-filha receba sua correta porção de cada um dos componentes qualitativamente diferentes do núcleo original.

O que é também interessante nesse período é que muitas observações e teorias corretas foram depois ignoradas, somente para serem descobertas depois. Roux, por exemplo, abandonou a própria teoria da mitose, que era válida, porque algumas observações sobre os óvulos em desenvolvimento pareciam contradizê-la. E a observação completamente correta de Van Beneden de que os cromossomos do núcleo do espermatozóide não se fundiam com os do núcleo do óvulo, o que daria a base observacional para as descobertas de Mendel, foi largamente ignorada até depois de 1900.

Nenhuma das especulações encontradas na literatura da filosofia da ciência sobre a formação de teorias é válida para os avanços altamente intrincados desse período, incluindo observações erradas e suposições falsas. Os avanços eram feitos às vezes por novas descobertas, às vezes por novas teorizações. Às vezes o que permitia os avanços era material vindo de novos organismos, como o óvulo de ouriço-do-mar de Oskar Hertwig e o embrião de rã de Remak, e às vezes, novas tecnologias, como a marcação com anilina usada com tanto sucesso mais tarde pelos citologistas. A única coisa perfeitamente evidente é que foi necessária uma abundância de novas observações e novas teorias sobre as quais um processo darwinista de seleção pudesse operar. Mais cedo ou mais tarde, determinada observação ou interpretação se tornaria incontestável e acabaria sendo aceita como “verdadeira”. Mesmo que ela fosse um dia refutada, como o foi a suposição de que as proteínas são o material da hereditariedade, apesar de ter sido aceita por trinta ou quarenta anos. A hipótese das proteínas estava tão solidamente estabelecida que, quando foi enfim substituída pela hipótese do DNA, alguns investigadores proeminentes, como Goldschmidt, ainda se recusavam a acreditar nela.

Durante os quarenta anos que se seguiram após 1880, aprimoramentos na microscopia permitiram descrições cada vez mais exatas dos núcleos e de suas mudanças nos ciclos de mitose e meiose, além da explicação do significado de tais mudanças. Como essa compreensão foi obtida é uma história altamente complexa, com contribuições tanto de grandes técnicos, que deram descrições excelentes de vários aspectos do processo de maturação e fertilização, quanto de teóricos brilhantes.⁵

Entendendo os cromossomos

O ponto de partida para as especulações que se seguiram foi a observação de que os corpos bem formados da cromatina, depois chamados de cromossomos, são observados durante a divisão celular (mitose), mas eram aparentemente substituídos por uma massa granular ou uma rede de fios finos durante o estágio de quiescência do núcleo. O problema era encontrar um significado para o que acontece quando esse material cromático irregular é convertido nos bem definidos cromossomos, especialmente depois de haver sido demonstrado que cada espécie tinha um número fixo de cromossomos mitóticos. Era difícil a princípio desenvolver uma teoria, uma vez que ninguém tinha a menor idéia de qual era o papel biológico da cromatina. Embora antes já se tivesse enunciado que a cromatina não passava de nucleína, essa conclusão não era de forma alguma aceita por todos, e, já que ninguém sabia realmente qual era a função da nucleína, essa identificação mais precisa também não tinha muita serventia.

Foi Weismann quem insistiu que o material genético estava localizado nos cromossomos, e, embora os detalhes de sua teoria da hereditariedade estivessem errados, ela desviou a atenção para a direção certa. A pessoa que mais contribuiu para o entendimento dos cromossomos foi Boveri. Ele começou com a observação sim-

ples de que havia um número fixo de cromossomos durante a mitose, e no material favorável ele pôde demonstrar a individualidade desses cromossomos, quer dizer, pôde reconhecer que cada um dos cromossomos tinha certas características diagnósticas. Depois de esses cromossomos terem sido "dissolvidos" na matéria nuclear do núcleo quiescente, Boveri pôde demonstrar que durante o ciclo mitótico seguinte o mesmíssimo número de cromossomos se formava novamente, como no último ciclo mitótico. E mais: que eles tinham as mesmas características que no ciclo anterior. Isso o levou à teoria da continuidade, segundo a qual os cromossomos nunca perdem sua individualidade durante a fase de quiescência do núcleo, e sim a mantêm por toda a vida da célula. Embora essa teoria tenha sido duramente atacada por Hertwig, ela finalmente se tornou a base para a teoria cromossômica da hereditariedade de Sutton-Boveri.

A teoria de Boveri era baseada em inferências. A continuidade dos cromossomos não podia ser observada diretamente. Havia algum conceito ou alguma ideologia mais profunda que tivesse reforçado em Boveri a convicção de que ele estava correto? Ou seus oponentes tinham alguma outra ideologia ou concepção que lhes dessem a certeza de que Boveri estava errado? Infelizmente não consegui, com base na literatura existente, chegar a uma conclusão sobre essa questão. Suspeito, todavia, que havia algo na formação conceitual de Boveri e Hertwig que levou à drástica diferença de opinião entre os dois. Desnecessário dizer, nenhum deles invocou nenhuma lei para apoiar suas opiniões. As conclusões de ambos foram baseadas em observações e no que cada um achava que fosse a inferência lógica a partir destas. Até agora essa discordância não foi explicada em termos que iluminem as controvérsias dos filósofos sobre a formação de teorias. Era talvez o argumento sobre a continuidade dos cromossomos em toda a fase de quiescência do núcleo ainda um resquício da

controvérsia entre a epigênese e a pré-formação, sendo Hertwig o epigenista e Boveri o pré-formacionista?

Os avanços na compreensão da célula só fizeram se acelerar após 1900. A princípio, as grandes contribuições foram dadas pela genética e pela fisiologia celular, seguidas depois pela exploração da estrutura fina da célula com a ajuda da microscopia eletrônica, e por fim com o estudo de todos os componentes do citoplasma pela biologia molecular. Mesmo que as observações fossem quase invariavelmente o ponto de partida de novos avanços, a formação de teorias claramente não resultava de simples indução. Em vez disso, as observações levantavam questões intrigantes, que levavam a conjecturas que eram ou falsificadas ou confirmadas, resultando no fim em novas teorias e explicações.

A história da citologia ilustra da maneira mais explícita o progresso gradual da ciência, o fracasso de teorias errôneas, a luta entre teorias concorrentes e a vitória final da interpretação que naquele momento tem o maior valor explicativo. E é inquestionável que a interpretação da célula e seus componentes adotada hoje é infinitamente superior ao conceito de célula dominante 150 anos atrás.

A CIÊNCIA AVANÇA POR MEIO DE REVOLUÇÕES?

Se podemos concluir, deste e de outros estudos de caso, que a ciência faz avançar continuamente a nossa compreensão da natureza, a próxima pergunta a ser feita é como esses avanços ocorrem. Este tópico altamente controverso ocupa uma grossa fatia da literatura da filosofia da ciência contemporânea. É possível distinguir duas escolas: (1) a teoria de Thomas Kuhn das revoluções científicas *versus* a ciência normal; (2) a epistemologia evolutiva darwinista.

Poucas publicações na filosofia da ciência criaram um rebulição tão grande quanto *A estrutura das revoluções científicas*, de Kuhn, em

1962. De acordo com a tese original de Kuhn, na sua primeira edição, a ciência avança por meio de revoluções ocasionais, separadas por longos períodos de “ciência normal”. Durante uma revolução científica, uma disciplina adota um “paradigma” inteiramente diferente, que então domina o período seguinte de ciência normal.

As revoluções (mudanças de paradigma) e os períodos de ciência normal são apenas dois aspectos da teoria de Kuhn. Outro aspecto é a suposta incompatibilidade entre o velho e o novo paradigma. Um dos críticos de Kuhn ironizou que este usara a palavra paradigma com pelo menos vinte sentidos diferentes na primeira edição de seu livro. Para o mais importante desses conceitos, Kuhn mais tarde introduziu o termo “matriz disciplinar”. Uma matriz disciplinar (paradigma) é mais do que uma nova teoria; ela é, de acordo com Kuhn, um sistema de crenças, valores e generalizações simbólicas. Há uma semelhança considerável entre a matriz disciplinar de Kuhn e termos como “tradição de pesquisa”, usados por outros filósofos.⁶

Muitos autores confirmaram as conclusões de Kuhn; talvez muitos mais tenham sido incapazes de fazê-lo. Os vários aspectos de sua tese não podem ser discutidos sem se examinar casos concretos e se perguntar se a mudança de teoria ocorrida nessas ocasiões seguiu ou não as generalizações dele. Portanto, com essa questão em mente, analisei algumas grandes mudanças teóricas na biologia.

O progresso na sistemática

Na ciência da classificação de plantas e animais (a sistemática; ver o capítulo 7), é possível distinguir um período inicial, dos herbalistas do século xvi a Lineu, durante o qual a maior parte das classificações era construída por divisão lógica, e a natureza das mudanças feitas de uma classificação para outra dependia do número de espécies classificadas e de pesar diferentes características. Esse tipo de metodologia é conhecido como *classificação de cima para baixo*.

No tempo devido, as pessoas se deram conta de que a classificação de cima para baixo era de fato um método de identificação, e ela foi suplementada por um método muito diferente, a *classificação de baixo para cima*, que consistia no arranjo de grupos cada vez maiores de espécies relacionadas entre si em classes, de forma hierárquica. No entanto, o método da classificação de cima para baixo continuou a existir paralelamente, sendo usado nas chaves de todas as revisões taxonômicas e em monografias e em guias de identificação de campo. A classificação de baixo para cima foi inicialmente usada por alguns herbalistas, depois por Magnol (1689) e por Adanson (1763), mas esse método não começou a ser adotado de modo mais geral até o último quartel do século xviii. Não houve nenhuma substituição revolucionária de um paradigma pelo outro, já que ambos continuaram a existir, embora hoje com objetivos diferentes.

Seria de esperar que a adoção da teoria da origem comum de Darwin, em 1859, fosse produzir uma grande revolução na taxonomia, mas não foi esse o caso. Na classificação de baixo para cima, os grupos são reconhecidos com base no maior número de caracteres compartilhados. Como era de esperar, os táxons assim delimitados consistiam geralmente em descendentes do ancestral comum mais próximo. Portanto, a teoria de Darwin forneceu a justificativa para o método de classificação de baixo para cima, mas não resultou em uma revolução científica na sistemática.

Cem anos mais tarde, depois de 1950, duas novas escolas de macrotaxonomia foram estabelecidas — a fenética numérica e a cladística. Chegaram estas a ser revoluções? A fenética produziu classificações insatisfatórias, portanto não teve um impacto grande. Além disso, ela trouxe uma metodologia, mas não um conceito novo de fato. Por outro lado, se se olhar para o volume da literatura atual, tem-se a impressão de que a cladística produziu com efeito uma grande revolução. Na verdade, a abordagem de reconhecer táxons a

interesses de pesquisa da morfologia e da sistemática era o fato de fornecer uma explicação teórica para evidências empíricas descobertas anteriormente, como a hierarquia lineana e os arquétipos de Owen e Von Baer. Ela não envolvia nenhum salto muito drástico de paradigma. Além disso, se fôssemos aceitar o período de Buffon (1749) a Darwin (1859) como um período de ciência normal, precisaríamos cassar o status revolucionário de uma série de revoluções menores, que também aconteceram nesse período. Isso inclui a descoberta da idade antiga da Terra, da extinção, a substituição da *scala naturae* pelos tipos morfológicos, as regiões biogeográficas, a realidade das espécies e assim por diante. Todas elas foram pré-requisitos para a teoria de Darwin e poderiam ser incluídas entre os componentes da primeira revolução darwinista, o que deslocaria a data de início dessa revolução para 1749.⁸

2 A segunda revolução darwinista foi iniciada pela teoria da seleção natural. Embora esta tivesse sido proposta e integralmente explicada em 1859, ela encontrou uma resistência tão firme, devido a seu conflito com cinco ideologias dominantes (criacionismo, essencialismo, teleologia, fisicalismo e reducionismo), que não foi aceita de forma geral até a síntese evolucionista dos anos 1930 e 1940. E, na França, na Alemanha e em outros lugares, há uma resistência considerável a ela mesmo hoje em dia.

Quando essa segunda revolução darwinista aconteceu — quando foi proposta, em 1859, ou quando foi amplamente adotada, na década de 1940? É possível considerar de 1859 até os anos 1940 um período de ciência normal? Na verdade, um número considerável de revoluções científicas menores aconteceu nesse período, como a rejeição da herança dos caracteres adquiridos (Weismann, 1883), a rejeição da herança por mistura (Mendel, 1866, e muitos artigos subseqüentes), o desenvolvimento do conceito biológico de espécie (Poulton, Jordan, Mayr), a descoberta da fonte da variação genética (mutação, recombinação gênica, diploidia), a apreciação

da importância dos processos estocásticos na evolução (Gulick, Wright), o princípio do fundador, a proposta de numerosos processos genéticos com conseqüências para a evolução e assim por diante. Muitas dessas descobertas tiveram um impacto bastante revolucionário no pensamento dos evolucionistas, mas sem qualquer dos atributos kuhnianos de revolução científica.

Depois da adoção geral da teoria sintética, digamos, de 1950 em diante, foram propostas modificações em quase todos os aspectos do paradigma, e algumas delas, adotadas. Mesmo assim, é difícil negar que de 1800 até hoje houve vários períodos de relativa quietude na biologia evolutiva, e outros períodos de mudanças vigorosas e controversas. Em outras palavras, nem a imagem kuhniana de revoluções curtas e bem definidas está correta nem a de um progresso lento, gradual e uniforme.

Algo que seria interessante, mas ainda não foi feito, é olhar os avanços em vários outros campos da biologia e verificar em que medida se qualificam como revoluções, se eles levaram à substituição de um paradigma por outro e quanto tempo levou para tal substituição ser completada. Por exemplo, a origem da etologia (proposta por Lorenz e Tinbergen) ou da teoria celular (Schwann, Schleiden) foram revoluções? Talvez o avanço mais revolucionário da biologia no século xx tenha sido a ascensão da biologia molecular. Ela resultou em um novo campo, com novos cientistas, novos problemas, novos métodos experimentais, novos periódicos, novos livros-texto e novos heróis, mas conceitualmente o novo campo não era nada senão uma suave continuação do progresso da genética, antes de 1953; não houve uma revolução durante a qual a ciência pregressa tivesse sido rejeitada.⁹ Não houve paradigmas incompatíveis. Em vez disso, o que aconteceu foi a troca de uma análise grosseira por uma análise refinada e o desenvolvimento de métodos inteiramente diferentes. A ascensão da biologia molecular foi revolucionária, mas não foi uma revolução kuhniana.

Praticamente todos os autores que tentaram aplicar a tese de Kuhn às mudanças teóricas em biologia descobriram que ela não é aplicável nessa área. Mesmo nos casos em que houve uma mudança revolucionária, ela não aconteceu da forma como Kuhn descreve. Antes de mais nada, não há uma diferença clara entre revoluções e “ciência normal”. O que se encontra é uma completa gradação entre mudanças teóricas pequenas e grandes. Diversas pequenas revoluções acontecem mesmo durante os períodos que Kuhn chamaria de ciência normal. Até certo ponto isso é admitido por ele próprio, mas essa percepção não chegou a induzi-lo a abandonar sua distinção entre revoluções e ciência normal.¹⁰

A introdução de um novo paradigma não resulta de forma alguma na imediata substituição do antigo em todos os casos. Conseqüentemente, a nova teoria revolucionária precisa coexistir com a antiga. Com efeito, até três ou quatro paradigmas podem existir simultaneamente. Por exemplo, depois que Darwin e Wallace propuseram a seleção natural como mecanismo da evolução, o saltacionismo, a ortogênese e o lamarckismo competiram com o selecionismo pelos oitenta anos seguintes.¹¹ Esses paradigmas concorrentes só perderam sua credibilidade com a síntese evolucionista dos anos 1940.

Kuhn não faz distinção entre as mudanças teóricas causadas por novas descobertas e aquelas que resultam do desenvolvimento de conceitos inteiramente novos. As mudanças causadas por descobertas geralmente têm um impacto muito menor que reviravoltas conceituais. Por exemplo, a inauguração da biologia molecular com a descoberta da estrutura da dupla-hélice teve conseqüências conceituais pequenas, e, portanto, não houve praticamente nenhuma mudança de paradigma na transição da genética para a biologia molecular.

Uma mesma teoria nova pode ser bem mais revolucionária para algumas ciências do que para outras. A tectônica de placas é um bom exemplo. Que essa teoria teve na geologia um impacto revolucionário, dir-se-ia cataclísmico, é algo óbvio. Mas e na biogeografia? Pelo menos no que diz respeito à distribuição das aves, a narrativa histórica inferida antes da tectônica de placas não mudou em nada (uma conexão no Atlântico Norte durante o Terciário é a única exceção) como resultado da adoção dessa teoria.¹² Claro, a distribuição das aves na Australonésia não concordava com as reconstruções da tectônica, mas pesquisas geológicas posteriores mostraram que as reconstruções geológicas eram falhas, ao passo que a reconstrução revisada se encaixava bem nos postulados biológicos.¹³ Que deve ter havido uma Pangéia no Permiano-Triássico é algo que havia sido postulado pelos paleontólogos muito antes de a tectônica de placas ser proposta. Em outras palavras, a interpretação da história da vida na Terra não foi nem de longe tão afetada pela aceitação da tectônica de placas quanto a geologia.

O maior impacto da introdução de um novo paradigma pode ser uma aceleração maciça na pesquisa em determinada área. Isso é especialmente bem ilustrado pela explosão na pesquisa filogenética depois que Darwin propôs a teoria da origem comum. Na anatomia comparada, bem como na paleontologia, muito da pesquisa feita após 1860 foi direcionado à busca da posição filogenética de determinados táxons, particularmente aqueles primitivos e aberrantes. Há muitos outros casos nos quais descobertas notáveis tiveram relativamente pouco impacto na estrutura teórica de uma área. A descoberta inesperada de Meyen e Remak de que novas células se originam a partir da divisão de velhas células, e não da conversão de um núcleo em uma célula nova, teve um impacto notavelmente pequeno. Da mesma forma, no que diz respeito à teoria genética, a descoberta de que o material genético eram os

ácidos nucléicos, e não as proteínas, não levou a nenhum grande salto de paradigma.

A situação é um pouco diferente no caso do desenvolvimento de novos conceitos. Quando as teorias de Darwin forçaram a inclusão do homem na árvore da origem comum, isso causou de fato uma revolução ideológica. Por outro lado, como corretamente enfatizou Popper (1975), o novo paradigma da hereditariedade de Mendel não surtiu efeito semelhante. Nunca é demais dizer que mudanças em conceitos têm um impacto muito maior que novas descobertas. Por exemplo, a substituição do pensamento essencialista pelo populacional teve um impacto revolucionário nos campos da sistemática, da biologia evolutiva e mesmo fora da ciência (na política). Essa mudança teve um efeito profundo na interpretação do gradualismo, da especiação, da macroevolução, da seleção natural e do racismo. A rejeição da teleologia cósmica e da autoridade da Bíblia teve efeitos igualmente drásticos na maneira de interpretar a evolução e a adaptação.

Não encontrar praticamente nenhuma confirmação da tese de Kuhn em um estudo de mudanças teóricas na biologia inevitavelmente nos força a perguntar: com que objetivo teria ele introduzido essa tese? Uma vez que grande parte das explicações em física lida com o efeito de leis universais, as quais não temos na biologia, é de fato possível que explicações que envolvam leis universais estejam sujeitas às revoluções kuhnianas. Mas também devemos nos lembrar de que Kuhn era físico e que sua tese, pelo menos da forma como foi apresentada em seus primeiros escritos, reflete o pensamento essencialista-saltacionista tão disseminado entre os físicos. Cada paradigma tinha naquela época, para Kuhn, a mesma natureza de um *eidos* ou essência platônica, e só poderia mudar quando substituído por um outro *eidos*. A evolução gradual seria impensável dentro desse arcabouço conceitual. Variações de um *eidos* são apenas “acidentes”, como diziam os filósofos escolásticos,

e portanto a variação que houver no período entre saltos de paradigma é essencialmente irrelevante, representando simplesmente a ciência normal.

A CIÊNCIA AVANÇA POR UM PROCESSO DARWINISTA?

O quadro da mudança teórica pintado por Kuhn em 1962 estava ligado visceralmente ao pensamento essencialista dos fisicalistas, mas era incompatível com o pensamento de um darwinista. Portanto, não surpreende que os darwinistas tenham favorecido uma conceitualização totalmente diferente para a mudança teórica na biologia, conhecida como epistemologia evolutiva darwinista. Como Feyerabend (1970) aponta, este é, de fato, um conceito filosófico muito antigo:

A idéia de que o conhecimento pode avançar através da luta entre visões alternativas e de que ele depende de proliferação foi proposta primeiro pelos pré-socráticos (isso foi enfatizado pelo próprio Popper) e foi formulada como uma filosofia geral por Mill (especialmente em *A liberdade*). A idéia de que a luta entre alternativas é decisiva para a ciência também foi introduzida por Mach (*Erkenntnis und Irrtum* [Conhecimento e erro]) e por Boltzmann (*Populärwissenschaftliche Vorlesungen* [Conferências científicas populares]), principalmente sob o impacto do darwinismo.

A principal tese da epistemologia evolutiva darwinista é que a ciência avança basicamente da mesma forma que o mundo orgânico — por meio de um processo darwinista. O progresso epistemológico é portanto caracterizado por variação e seleção. Mais precisamente: “Idéias mais robustas ou idéias com maior verossimilhança ou maior poder explanatório ou maior capacidade de

resolver problemas etc. sobrevivem melhor de uma geração para a outra na luta por aceitação” (Thompson, 1988: 235). É possível documentar esse processo nas próprias elaborações teóricas de Darwin. Em sua juventude, propôs uma teoria evolutiva após a outra, que ele sempre ia rejeitando, até chegar a sua evolução por descendência através da seleção natural.¹⁴ Ou no período pós-darwinista seria possível descrever a grande variedade de teorias evolutivas que competiram com a seleção natural — o lamarckismo, o saltacionismo, a ortogênese —, deixando a seleção natural como única sobrevivente bem-sucedida. Há, com efeito, uma grande semelhança com a seleção natural na competição entre conjecturas e hipóteses que lidam com um problema epistemológico, com uma ou outra por fim triunfando, ao menos temporariamente. Num nível superficial, não há dúvida de que o avanço histórico das teorias científicas guarda uma forte semelhança com o processo darwinista de mudança evolutiva.

Quando analisadas mais de perto, no entanto, as mudanças epistemológicas ocorrem de uma maneira que difere em muitos aspectos da mudança evolutiva genuína.¹⁵ A variação que existe, por exemplo, entre as várias teorias concorrentes não é causada pelo acaso, como ocorre com a variação genética, e sim pelo raciocínio dos que promovem essas teorias. Embora seja verdadeiro, esse argumento não tem tanto peso porque a fonte da variação não importa muito para o processo darwinista. Darwin, por exemplo, aceitava alguns processos lamarckistas que depois acabariam refutados, como o “uso e desuso” e um efeito direto do ambiente como fontes de nova variabilidade. Mesmo na teoria sintética dos anos 1940, muitas fontes de variação são aceitas: mutação, recombinação, variação enviesada, transferência horizontal, hibridação, entre outras. Portanto, é irrelevante se a variação é produzida pelo acaso ou não.

O equivalente da transmissão de geração em geração na epistemologia evolutiva é a transmissão cultural, algo muito diferente

da transmissão genética, para citar apenas mais uma de uma série de diferenças. Além disso, os grandes avanços teóricos (as “revoluções kuhnianas”) talvez sejam mais drásticos que as mudanças genéticas compatíveis com a natureza das populações biológicas.

Mesmo sendo óbvio que as mudanças epistemológicas não são isomórficas com as mudanças evolutivas darwinistas, é verdade que elas ocorrem de acordo com o modelo darwinista básico de variação e seleção. Em um grupo de teorias concorrentes, aquela destinada a prevalecer no final é a que encontra menos problemas e que consegue explicar o maior número de fatos de maneira satisfatória — em outras palavras, a teoria “mais apta”. Este é um processo darwinista. Em epistemologia, como entre as populações biológicas, há uma produção contínua de novas variações, ou seja, de novas conjecturas. Há uma grande variação no tamanho das mudanças — muitas delas são mínimas, outras são drásticas o bastante a ponto de merecerem ser chamadas de revoluções. A descendência ramificada, a seleção natural e os ácidos nucleicos em vez das proteínas como portadores da informação genética estão entre os avanços que tiveram o impacto mais revolucionário.

A partir dessas observações é possível tirar as seguintes conclusões: (1) Há de fato revoluções maiores e menores na história da biologia. No entanto, mesmo as maiores revoluções não representam necessariamente mudanças de paradigma repentinas e drásticas. (2) Um paradigma velho e o subsequente podem coexistir por longos períodos. Eles não são necessariamente incompatíveis. (3) Os ramos ativos da biologia não parecem experimentar períodos de “ciência normal”. Sempre há uma série de pequenas revoluções entre as grandes revoluções. Períodos sem tais revoluções só são encontrados em ramos inativos da biologia, mas seria inadequado chamar esses períodos quietos de “ciência normal”. (4) A epistemologia evolutiva darwinista parece se adequar muito melhor às mudanças teóricas na biolo-

gia que a descrição de Kuhn das revoluções científicas. Áreas ativas da biologia vêm todo tempo a proposta de novas conjecturas (variação darwinista), algumas das quais mais bem-sucedidas que outras. É possível dizer que estas são “selecionadas”, até que sejam substituídas por outras ainda melhores que elas, ou dizer que as conjecturas inválidas ou inferiores são eliminadas de modo que, no final, a única teoria que sobrar seja a mais bem-sucedida em explicar as coisas. (5) Um paradigma dominante tende a ser mais fortemente afetado por um novo conceito do que por uma nova descoberta.

Por que é tão difícil atingir o consenso científico

Os não-cientistas freqüente e ingenuamente assumem que, uma vez que uma nova explicação científica tenha sido proposta, ela será rapidamente adotada. Na verdade, são muito raros os casos em que um novo e repentino vislumbre levou a uma iluminação revolucionária instantânea em um campo da ciência. A maioria dos pilares da ciência moderna precisou superar anos de resistência, vinda tanto de dentro quanto de fora da ciência. Como já vimos, a teoria da seleção natural de Darwin e Wallace não foi adotada pela maioria dos cientistas, de 1859 até por volta de 1940. A deriva continental foi primeiro proposta por Wegener em 1912, embora tivesse tido um bom número de precursores. Os geofísicos se opunham a ela unanimemente, argumentando apenas que nenhuma força conhecida poderia mover continentes inteiros pelo globo afora ou que ela não podia explicar a geologia do fundo oceânico. Alguns dos casos biogeográficos citados em apoio à deriva (padrões de distribuição no Pleistoceno) foram mal escolhidos e facilmente refutados. No entanto, mais e mais evidências da deriva continental foram se acumulando depois, especialmente através das pesquisas dos paleontólogos, de modo que no começo

da década de 1960, quando o afastamento do leito oceânico e os fenômenos magnéticos relacionados foram descobertos, a deriva continental foi aceita em poucos anos.¹⁶

Outra teoria proposta bem antes de ser aceita foi a especiação geográfica (multiplicação das espécies). Com base nas evidências coletadas nas Galápagos, Darwin a princípio (nos anos 1840) apoiou a especiação geográfica estrita. Mas depois (nos anos 1850) ele também aceitou a especiação simpátrica, e até chegou a pensar que esta era um processo mais freqüente e mais importante.¹⁷ A visão de Moritz Wagner (1864, 1889) de que a especiação é geralmente geográfica era minoritária até 1942.¹⁸ Nos oitenta anos que se seguiram a 1859, o mapeamento da distribuição das subespécies, das espécies incipientes e das espécies próximas de aves, mamíferos, borboletas e caramujos levou à convicção quase universal de que a especiação geográfica é o principal e talvez quase exclusivo modo de especiação em organismos que se reproduzem sexualmente. Desde aquela época, tantos argumentos novos têm sido apresentados em favor da especiação simpátrica e de outras formas de especiação não-geográfica que a questão sobre se esses outros modos de especiação ocorrem, e, se ocorrem, em que medida, ainda é controversa.* Posições conceituais estão claramente envolvidas nessa discussão, com alguns autores abordando o problema do ponto de vista da geografia populacional e outros extraindo suas argumentações da ecologia local.

As razões pelas quais algumas teorias precisam lutar durante décadas por aceitação enquanto outras têm sucesso quase instantâneo são diversas; listarei seis delas.¹⁹

* Mayr era conhecido entre os evolucionistas por sua oposição ferrenha à especiação simpátrica, posição que seria suavizada após este livro. Em seu livro de 2001 *What evolution is*, ele admite haver evidências convincentes de que esse mecanismo de especiação ocorre em diversas famílias de insetos e de peixes de água doce. (N. T.)

Uma razão para o consenso levar tempo é que conjuntos diferentes de evidências levam a conclusões diferentes. Por exemplo, os estudantes da especiação geográfica se impressionam o tempo todo com o gradualismo do processo de especiação e consideram isso uma evidência poderosa da evolução gradual. Por outro lado, muitos paleontólogos têm igualmente se impressionado com a universalidade, no registro fóssil, de hiatos entre espécies, bem como entre táxons mais elevados, e consideram isso uma evidência igualmente convincente de evolução saltacional. O desafio resultante, portanto, é mostrar como o descontínuo registro fóssil pode ser reconciliado com o processo gradual de especiação. Isso foi tentado por Mayr, Eldredge, Gould e Stanley.²⁰

Uma segunda razão pelas qual é difícil atingir o consenso é que cientistas que discordam entre si aderem a ideologias diferentes, o que torna certas teorias aceitáveis para um grupo e impossíveis para outro. Por exemplo, a teoria da seleção natural era inaceitável em 1859 (e nos anos seguintes) para os criacionistas, os teólogos naturais, os teleologistas e os fisicalistas deterministas. A substituição de ideologias ("paradigmas profundos") enfrenta muito mais resistência que a substituição de teorias errôneas. Idéias como o vitalismo, o essencialismo, o criacionismo, a teleologia e a teologia natural foram parte essencial da visão de mundo daqueles que as defendiam e, como tal, não haveriam de ceder facilmente. Conceitos opostos a elas, portanto, se disseminaram lentamente, recrutando adeptos que não tinham uma visão de mundo tão firme.

Uma terceira razão é que, em dado momento, várias explicações podem parecer dar conta de um mesmo fenômeno igualmente bem. Um exemplo é a orientação de longa distância das aves, que já foi atribuída à orientação do Sol, ao magnetismo, ao olfato e outros fatores.

Em alguns casos, há realmente uma pluralidade de respostas possíveis. Por exemplo, a especiação completa pode ser atingida

pela aquisição de mecanismos de isolamento antes ou depois do acasalamento; ou uma especiação geográfica relativamente rápida pode acontecer tanto em populações fundadoras quanto em populações de relictos; ou o status de espécie pode ser atingido por meio de uma reorganização de cromossomos.

Às vezes não é possível chegar a um consenso porque um biólogo está preocupado com causas próximas e outro com causas evolutivas. Para T. H. Morgan o dimorfismo sexual era explicado pelos hormônios sexuais (uma causa próxima), enquanto para os estudiosos da evolução ele é explicado pela seleção para o sucesso reprodutivo (uma causa última ou evolutiva).

Alguns fatores que trabalham contra a aceitação de novas idéias não são estritamente científicos. Talvez um autor não tenha caído nas graças do *establishment* do momento ou o tenha ofendido, enquanto outro tenha tido um sucesso inesperado com uma teoria subsequentemente refutada por pertencer a uma claqué poderosa. Quando os cientistas envolvidos pertencem a diferentes escolas ou a países nos quais diferentes esquemas explicativos têm uma tradição, o consenso pode ser mais difícil de obter. Supostamente nesses casos uma das cinco razões listadas acima foi a causa primária, mas, uma vez estabelecida uma tradição, ela foi mantida tenazmente mesmo diante de todas as evidências em contrário. Um exemplo é a preferência de muitos autores franceses por uma interpretação lamarckista da evolução, ao passo que nos outros países o selecionismo já venceu. O *establishment* científico de um país em geral aceita mais facilmente o trabalho de um compatriota, ou de um autor que pelo menos tenha publicado na sua língua, do que os trabalhos de estrangeiros. Trabalhos importantes publicados em russo, japonês ou mesmo em outras línguas da Europa ocidental que não o inglês tendem a ser negligenciados, quando não simplesmente ignorados. Mesmo que as idéias contidas em tais publicações negligenciadas sejam um dia adotadas,

com frequência isso se deve à sua redescoberta subsequente por alguém, e a prioridade da publicação mais antiga é esquecida.

OS LIMITES DA CIÊNCIA

Em seu famoso ensaio *Ignoramus, ignorabimus* (“Não sabemos, nunca saberemos”), de 1872, DuBois-Reymond listou diversos problemas científicos que ele tinha certeza de que a ciência jamais conseguiria resolver. Porém, em 1887 ele precisou admitir que alguns deles já haviam sido resolvidos. Com efeito, alguns de seus críticos disseram que *todos eles* já haviam sido resolvidos em princípio, ou estavam a caminho da resolução.

Ocasionalmente, lemos uma declaração empolgada demais de que a ciência pode achar a solução para todos os nossos problemas. Todo bom cientista sabe que isso não é verdade.²¹ Algumas das limitações da ciência são práticas, enquanto outras são uma questão de princípio. Há uma concordância geral de que alguns experimentos com seres humanos estão fora dos limites por princípio. Eles violam nossos padrões morais, talvez até nosso senso de moral. Certos experimentos na “*big physics*”,* por outro lado, são simplesmente caros demais para justificar apoio. Aqui também há um limite, embora neste caso o limite seja prático.

Um limite prático à ciência é a dificuldade de explicar à exaustão o funcionamento de um sistema altamente complexo. Tenho certeza de que, no seu devido tempo, entenderemos, em princípio, como funcionam o desenvolvimento, o cérebro e um ecossistema.

* *Big physics*: termo aplicado à física de grandes experimentos, que grupos geralmente internacionais fazem usando aceleradores de partículas de bilhões de dólares, como os do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN — Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). (N. T.)

Mas considerando, por exemplo, que há mais de 1 bilhão de neurônios no cérebro, a análise completa de dado processo de pensamento pode ser complexa demais para ser feita em detalhe.

O mesmo problema de ordem prática pode ser colocado no que diz respeito aos mecanismos regulatórios do genoma, que são altamente complexos e estão longe de ser entendidos. Qual é a função (se há alguma) das vastas quantidades e dos diferentes tipos de DNA não-codificante? Alguns organismos têm mais DNA nessa forma do que na forma de genes codificantes. Assumir que todo esse DNA é um subproduto indesejável (“lixo”) de vários processos moleculares não é uma solução palatável para um darwinista. Já houve propostas não-darwinistas, mas elas não são convincentes. Esta é claramente uma área de ciência inacabada. Meu chute é que parte desse DNA é de fato um subproduto não selecionado (ou ainda não contra-selecionado) de processo molecular, mas que outros componentes dele são partes do complexo maquinário regulatório do genoma.

A maioria dos problemas relacionados com perguntas do tipo “O quê?” e “Como?” é, ao menos em princípio, passível de elucidação científica. Com as questões do tipo “Por quê?” é diferente. Muitas destas, especialmente aquelas relacionadas com as propriedades básicas das moléculas, são impossíveis de responder. Por que o ouro é dourado? Por que as ondas eletromagnéticas de certo comprimento de onda produzem nos nossos olhos a sensação de vermelhidão? Por que as rodopsinas são as únicas moléculas que têm a capacidade de traduzir luz em impulsos nervosos? Por que os corpos respondem à gravidade? Por que os núcleos atômicos são compostos de partículas elementares?

Algumas dessas questões são provavelmente passíveis de resolução pela química, pela mecânica quântica e pela biologia molecular. Mas há outras “grandes questões”, pertencentes à esfera dos valores, que nunca poderão ser respondidas. Isso inclui as

muitas perguntas geralmente feitas por não-cientistas. “Por que existo?”, “Qual é o propósito do mundo?” e “O que havia antes do começo do universo?” — todas essas perguntas, e há um número interminável delas, lidam com problemas que estão fora do domínio da ciência.

Às vezes se pergunta sobre o futuro da ciência. Considerando a sede de conhecimento implacável do homem, a incompletude do nosso entendimento atual e o grande sucesso da tecnologia baseada em ciência, para mim não há dúvida de que a ciência continuará a se desenvolver e avançar como tem feito nos últimos 250 anos. Como Vannevar Bush tão corretamente afirmou, a ciência é de fato uma fronteira infinita.

6. Como se estruturam as ciências da vida?

A biologia, da forma como existe hoje, é uma ciência extraordinariamente diversificada. Parte disso se deve ao fato de ela lidar com organismos tremendamente variados, que vão de vírus e bactérias a fungos, plantas e animais. Ela também lida com muitos níveis hierárquicos, de macromoléculas orgânicas e genes até células, tecidos, órgãos e organismos inteiros, e as interações e a organização desses organismos em famílias, comunidades, sociedades, populações, espécies e biota. Cada nível de atividade e organização é uma área de especialização com seu próprio nome — citologia, anatomia, genética, sistemática, etologia ou ecologia, para citar só algumas. Além disso, a biologia tem uma ampla gama de aplicações práticas e deu origem a, ou pelo menos está envolvida em, numerosos campos aplicados, como a medicina, a saúde pública, a agricultura, a silvicultura, o melhoramento animal e vegetal, o controle de pragas, a pesca, a oceanografia biológica e assim por diante.

Embora a biologia enquanto ciência moderna tenha se originado em meados do século XIX, suas raízes, como vimos, remontam aos antigos gregos. Duas tradições distintas, que surgiram há

mais de 2 mil anos, são reconhecíveis ainda hoje: a tradição médica, representada por Hipócrates e seus predecessores e sucessores, e a tradição da história natural. A tradição médica, tendo atingido seu apogeu no mundo antigo com o trabalho de Galeno (ao redor dos anos 130-200), levou ao desenvolvimento da anatomia e da fisiologia, enquanto a tradição da história natural, tendo culminado na *História dos animais*, de Aristóteles, e em seus outros trabalhos biológicos, acabaria dando origem à sistemática, à biologia comparativa e à biologia evolutiva.

A separação entre a medicina e a história natural continuou durante a Idade Média e o Renascimento. As duas tradições, no entanto, estavam ligadas pela botânica, porque esse campo, embora fosse um ramo da história natural, se dedicava às plantas que se acreditava terem propriedades medicinais. Com efeito, todos os principais botânicos do século XVI ao final do XVIII — ou seja, de Cesalpino a Lineu — eram médicos, sendo John Ray a única exceção. Os componentes biológicos mais estritos da medicina, no tempo devido, acabaram sendo a anatomia e a fisiologia, e a botânica e a zoologia se tornaram os da história natural, enquanto a paleontologia ficou ligada à geologia. Essa classificação das ciências da vida predominou do final do século XVIII até boa parte do XX.¹

A Revolução Científica teve um impacto reduzido sobre a biologia. O efeito mais decisivo foi a descoberta, nos séculos XVII e XVIII, da diversidade quase inimaginável das faunas e floras de diferentes partes do mundo. O rico butim trazido por viagens oficiais e por exploradores individuais (como os alunos de Lineu, que coletavam plantas) levou à fundação de coleções de história natural e museus, e favoreceu uma ênfase na sistemática (ver o capítulo 7). Com efeito, a biologia na era de Lineu consistia quase inteiramente em sistemática, exceto pelos estudos de anatomia e fisiologia nas escolas médicas.

Quase todo o trabalho nas ciências da vida durante aquele período era descritivo. Seria um erro, no entanto, considerar esse período da biologia como conceitualmente estéril. Foram o trabalho em história natural de Buffon, a fisiologia de Bichat e Magendie, a morfologia idealista de Goethe, o trabalho de Blumenbach e seus seguidores Cuvier, Oken e Owen e as especulações da *Naturphilosophie* [filosofia natural] que lançaram os alicerces da maioria dos avanços subsequentes. Ainda assim, em vista da enorme diversidade e singularidade do mundo vivo, a biologia precisou de uma base factual muito mais ampla que as ciências físicas. Essa base não foi construída somente pela sistemática, mas também pela anatomia comparada, paleontologia, biogeografia e pelas ciências afins.

O termo biologia foi introduzido na literatura por volta de 1800 por Lamarck, Treviranus e Burdach.² Mas, a princípio, não havia na verdade nenhum campo de pesquisa digno desse nome. O termo indicava, no entanto, uma tendência ou objetivo, e significava um afastamento dos esforços estritamente descritivos, taxonômicos, e um movimento no sentido de um interesse maior nos organismos vivos. Treviranus (1802: 4) oferece a seguinte descrição: “O assunto das nossas investigações será as várias formas e manifestações da vida, as condições e leis que controlam sua existência e as causas pelas quais isso se dá. A ciência que se ocupa desses temas designaremos biologia ou ciência da vida”.

As origens da ciência da biologia tal como a conhecemos hoje tiveram lugar entre 1828 e 1866, e estão associadas com os nomes Von Baer (embriologia), Schwann e Schleiden (teoria celular), Müller, Liebig, Helmholtz, DuBois-Reymond, Bernard (fisiologia), Wallace e Darwin (filogenia, biogeografia, teoria evolutiva) e Mendel (genética). Esse período vibrante foi coroado pela publicação de *A origem das espécies*, em 1859. Avanços nesses 38 anos levaram à maioria das disciplinas que conhecemos hoje na biologia.

OS MÉTODOS COMPARATIVO E EXPERIMENTAL NA BIOLOGIA

Desde o *kosmos* grego até os tempos modernos, filósofos e cientistas têm se valido de duas abordagens principais em sua busca de alguma ordem subjacente na natureza. A primeira é a procura de leis que dêem conta das regularidades observadas por eles. A outra é a procura de “relacionamentos”. Isso não significava, a princípio, uma relação filogenética — mas, simplesmente, “ter coisas em comum”. Algo que só podia ser estabelecido por meio de comparações.

O método comparativo obteve seu maior triunfo com o trabalho de Cuvier e seus associados, quando estes desenvolveram a morfologia comparativa. A princípio esse era um esforço puramente empírico, mas após a proposta da teoria da origem comum por Darwin, em 1859, tornou-se um método científico cada vez mais rigoroso. O método comparativo se tornou tão bem-sucedido que foi aplicado a outras disciplinas biológicas, levando à fisiologia comparativa, à embriologia comparativa, à psicologia comparativa e assim por diante. A macrotaxonomia moderna é quase exclusivamente comparativa.

Um grande impulso dado à nova ciência da biologia foi a invenção e o desenvolvimento de novos instrumentos. Instrumentos inventados por Johannes Müller e seus alunos e por Claude Bernard foram decisivos para os avanços pioneiros da fisiologia. Nenhum outro instrumento, no entanto, teve um impacto maior sobre a ascensão da biologia do que o microscópio, continuamente aperfeiçoado. Ele resultou no desenvolvimento de duas novas disciplinas, a embriologia e a citologia.³

Depois de 1870, a biologia sofreu uma cisão, por razões que não foram bem compreendidas na época. A biologia das causas evolutivas (com sua ênfase quase exclusiva na filogenia) era baseada

em comparações ou em inferências a partir de observações (que seus oponentes chamavam de especulação). A biologia das causas próximas, por outro lado (primariamente a fisiologia e a embriologia experimental), destacavam abordagens experimentais. Representantes dessas duas escolas da biologia debatiam ferozmente qual das duas estava certa. Hoje, logicamente, está claro que ambos os conjuntos de perguntas devem ser respondidos.

Quando se descobriu que a estrutura e a função das células era a mesma em animais e plantas, e que isso também valia para o modo de herança das características do indivíduo, a velha divisão entre botânica e zoologia deixou de ter muito sentido. Isso era especialmente verdadeiro depois que se descobriu que todos os processos moleculares em ambos os reinos eram bastante similares, virtualmente idênticos mesmo, e depois que se estabeleceu que fungos e procariontes eram diferentes tanto do reino animal quanto do vegetal. Ficou cada vez mais óbvio que, em uma nova classificação, seria preciso procurar novos princípios ordenadores, que não fossem baseados no tipo de organismo.

Depois do desenvolvimento da biologia celular e molecular, algumas pessoas argumentaram que a zoologia e a botânica não seriam mais necessárias. No entanto, em certas áreas, como a taxonomia e a morfologia, a necessidade de lidar com plantas e animais separadamente permaneceu. O desenvolvimento e a fisiologia são, da mesma maneira, bastante diferentes em plantas e em animais, e os estudos do comportamento dizem respeito a animais somente. Por mais brilhantes que sejam os avanços na biologia molecular, a biologia de organismos inteiros continua a ser uma necessidade vital, embora essa biologia talvez precise ser organizada de maneira muito diferente da tradicional.

Fora essas exceções, no entanto, todos os problemas da biologia dizem respeito a plantas e animais. O que é particularmente interessante na origem das várias novas disciplinas biológicas é

que ela teve contribuições equivalentes de estudiosos tanto de plantas quanto de animais. O botânico Brown descobriu o núcleo da célula, e o botânico Schleiden com o zoólogo Schwann propuseram a teoria celular, desenvolvida por Virchow, que veio da zoologia e da medicina. O problema da fertilização, da mesma forma, foi resolvido por meio de uma série de descobertas feitas por botânicos e zoólogos, e isso é igualmente válido para a citologia e, mais tarde, para a genética.

Já se tentou diversas vezes desenvolver uma classificação racional de todas as disciplinas da biologia, para lidar com o enorme leque de fenômenos unidos sob a bandeira da biologia, mas nenhuma dessas tentativas teve sucesso. De todas as classificações propostas ao longo do tempo, nenhuma foi mais enganosa que aquela que reconhecia três ramos da biologia: a descritiva, a funcional e a experimental. Essa classificação não só excluía campos inteiros da biologia (como a biologia evolutiva), como também ignorava o fato de que a descrição é uma necessidade de quase todas as partes da biologia, e que a experimentação é parte crucial das análises somente na biologia funcional. Além disso, os experimentos são mais importantes não tanto como meio de coleta de dados, mas para testar conjecturas.

Driesch revelou quão pouco ele entendia a estrutura da biologia quando observou quão acertado era o fato de que as universidades alemãs agora só contratavam biólogos experimentais e nenhum taxonomista. Aqui ele aglutinou a biologia evolutiva, a etologia e a ecologia com a taxonomia e considerou todas as partes da biologia de organismos como ciências puramente descritivas, pelo fato de não serem experimentais. O comentário de Gillispie de que a taxonomia não interessa ao historiador é outra concepção errônea das diferentes disciplinas biológicas.

NOVAS TENTATIVAS DE ESTRUTURAR A BIOLOGIA

Em 1955, o Conselho de Biologia organizou um simpósio especial dedicado a analisar os conceitos da biologia e a como melhor representar a estrutura da biologia.⁴ Os critérios pelos quais vários autores propuseram dividir a biologia em disciplinas eram excessivamente variados. Bastante favorecida foi a divisão de Mainx em morfologia, fisiologia, embriologia e outras poucas matérias-padrão, em geral hierarquicamente subdivididas em citologia, histologia, fisiologia de órgãos completos e assim por diante, com base em considerações morfológicas. Outra classificação amplamente aceita, proposta por P. Weiss, escolheu uma abordagem mais ou menos hierárquica: biologia molecular, biologia celular, biologia genética, biologia do desenvolvimento, biologia regulatória, biologia de grupo e ambiental.⁵ Muitos dos comitês de avaliação da Fundação Nacional de Ciências [dos Estados Unidos] foram rotulados de acordo com essa classificação. É interessante (e não surpreende) que o experimentalista Weiss tenha agrupado todos os aspectos da biologia de organismos (as biologias sistemática, evolutiva, ambiental e comportamental) em uma única categoria, "biologia de grupo e ambiental", enquanto reservou cinco categorias de igual peso para níveis hierárquicos abaixo de organismos inteiros.

Em geral, os critérios de classificação que qualquer autor sugere são fortemente influenciados por sua formação. Se ele vier das ciências físicas, tenderá a destacar a experimentação, a redução e os componentes unitários, e a se concentrar em processos funcionais.⁶ Por outro lado, os biólogos formados como naturalistas tenderão a destacar a diversidade, a singularidade, as populações, os sistemas, as inferências a partir de observações e os aspectos evolutivos.

Em 1970, o Comitê para as Ciências da Vida da Academia Nacional reconheceu doze categorias, das quais as últimas três

eram áreas aplicadas: (1) biologia molecular e bioquímica, (2) genética, (3) biologia celular, (4) fisiologia, (5) biologia do desenvolvimento, (6) morfologia, (7) biologia evolutiva e sistemática, (8) ecologia, (9) biologia comportamental, (10) nutrição, (11) mecanismos de doenças, (12) farmacologia.⁷ Embora fosse uma melhora em relação aos outros sistemas, este também tinha problemas, como considerar a biologia evolutiva e a sistemática uma única disciplina.

Finalmente, acabou-se por perceber que o tipo de pergunta que se faz na pesquisa científica pode ajudar a levar a uma classificação mais lógica das disciplinas biológicas. As três grandes questões são: "O quê?", "Como?" e "Por quê?".

Perguntas do tipo "O quê?"

Não é possível fazer ciência, qualquer ciência, sem primeiro estabelecer uma base factual sólida — ou seja, registrar as observações e descobertas nas quais se baseia uma dada teoria. A descrição é, portanto, uma parte importante de qualquer disciplina científica.

Curiosamente, anexar a palavra "descritiva" a qualquer disciplina científica sempre teve uma conotação um tanto pejorativa. Os fisiologistas tendiam a chamar o trabalho dos morfólogos de descritivo, embora, estritamente falando, o trabalho dos fisiologistas fosse em sua maior parte tão descritivo quanto o dos morfólogos. Alguns biólogos moleculares confessaram ter vergonha de que uma parte tão grande do trabalho publicado em seu campo não seja nada além de um registro de fatos (descrição). Não há necessidade de tal vergonha, porque a biologia molecular, sendo uma área nova, precisa, como todos os ramos da ciência, passar por essa fase descritiva.

Seria enganoso reconhecer uma disciplina separada chamada biologia descritiva. A descrição é o primeiro passo de qualquer

ramo da biologia. A taxonomia, o reconhecimento de espécies e táxons mais elevados, não é mais descritiva do que boa parte da biologia celular ou molecular ou, a propósito, o projeto genoma. A descrição não deveria nunca ser vilipendiada, porque ela é o alicerce indispensável de toda pesquisa explanatória e interpretativa na biologia.⁸

O surpreendente é que os próprios taxonomistas, antes de Rensch, Mayr, Simpson e Hennig, tinham pouca noção do valor da própria disciplina. Em um debate intitulado "Tendências atuais na teoria biológica", o grande taxonomista de formigas W. M. Wheeler (1929: 192) disse que a taxonomia "é a única ciência biológica que não tem teoria, sendo meramente diagnóstico e classificação". Quão errada estava essa idéia é algo que foi esclarecido, por exemplo, pelas publicações de Hennig, Simpson, Ghiselin, Mayr, Bock, Ashlock e Hull.⁹

Todas as ciências lidam com fenômenos e com processos, mas em algumas ciências predomina o estudo de fenômenos, em outras o de processos. Os fisiologistas, que se ocupam de explicar o maquinário da vida, lidam quase exclusivamente com processos. Os biólogos evolutivos, no entanto, também lidam com processos, aqueles que levaram à mudança evolutiva, especialmente a novas adaptações e a novos táxons. Mas uma das principais ocupações do naturalista sempre foi o estudo da diversidade da vida. O estudo da diversidade orgânica é a área de concentração especial de muitas disciplinas biológicas, sobretudo a taxonomia e a ecologia. Ele envolve uma interação entre sistemas completos e requer uma estratégia diferente, por exemplo, da usada na análise de processos fisiológicos simples, como os estudados no laboratório.

O estudo da diversidade requer invariavelmente, como seu primeiro passo, uma descrição precisa e completa. Isso é particularmente verdade para a taxonomia (incluindo a paleontologia e a parasitologia), a biogeografia, a autecologia e todos os ramos da

biologia comparativa (incluindo a bioquímica comparativa). Essa base descritiva permite as comparações que conduzem às generalizações características das várias subdisciplinas da biologia evolutiva. A crítica se justifica somente quando os cientistas nunca vão além da descrição. Os resultados mais importantes da ciência são as generalizações e teorias que derivam do material factual bruto.

Em qualquer área, a fase de coleta de dados raramente chega a se completar. Não só a ciência como um todo tem uma fronteira infinita, como cada uma de suas subdivisões também tem. Sempre que novos métodos de coleta de dados se tornam disponíveis, horizontes inteiros se abrem à vista. Exemplos disso são o advento do microscópio eletrônico em citologia, os equipamentos de mergulho para pesquisa em águas rasas ou os novos métodos para coletar animais no dossel das florestas tropicais. A zoologia de invertebrados fez grandes avanços quando se desenvolveram tecnologias para coletar a meiofauna na camada de baixo do oceano, a fauna pelágica e a bêntica em águas profundas e os organismos associados com as chaminés vulcânicas nas profundezas do mar.

Olhando para trás na história da biologia, os biólogos quase ficam com vergonha ao constatar quão negligenciados foram todos os organismos que não eram animais nem plantas superiores. Por exemplo, tudo aquilo que não era claramente um animal era tido como pertencente a domínio da botânica. Apenas recentemente os biólogos se deram conta de quão diferentes os fungos são das plantas (de fato, eles são mais aparentados com os animais) e, ainda mais recentemente, perceberam quão incrivelmente diferentes os procariontes (bactérias e seus parentes) são dos eucariontes (incluindo os protistas, os fungos, as plantas e os animais). Os *Prokaryota* são hoje reconhecidos como um super-reino separado e dão um exemplo notável da fronteira infinita que existe na biologia, mesmo no nível descritivo.

Perguntas do tipo "Como?" e "Por quê?"

Só as respostas às perguntas do tipo "O quê?" não bastaram para produzir uma solução satisfatória para o problema de como classificar as subdivisões da biologia. Portanto, precisamos agora nos voltar para as perguntas do tipo "Como?" e "Por quê?".¹⁰ Na biologia funcional, bem como em todos os aspectos da fisiologia — do nível molecular até o dos órgãos completos —, as pesquisas lidam primariamente com perguntas do tipo "Como?". Como determinada molécula desempenha sua função? Por que via um órgão completo funciona? Tais questões, que lidam com o aqui e o agora, são conhecidas como o estudo das causas próximas. Esse campo, do nível molecular até o dos organismos completos, lida primariamente com a análise de processos.

"Como?" é a pergunta mais freqüente nas ciências físicas e levou à descoberta das grandes leis naturais. Esta foi também a pergunta dominante na biologia até o início dos anos 1800, porque as disciplinas biológicas principais de então, a fisiologia e a embriologia, eram dominadas pelo pensamento fisicalista. Essas duas disciplinas se preocupavam quase exclusivamente com o estudo das causas próximas. É claro que perguntas do tipo "Por quê?" também eram feitas, mas, sendo o cristianismo então a ideologia predominante no mundo ocidental, tais questões inevitavelmente levavam à resposta fácil: Deus, o Criador (criacionismo), Deus, o Fazedor de Leis (fisicalismo) e Deus, o Projetista [Designer] (teologia natural).

Questões do tipo "Por quê?" lidam com os fatores históricos e evolutivos responsáveis por todos os aspectos dos organismos vivos que existem ou existiram no passado. Por que os beija-flores são exclusivos do Novo Mundo? Por que os animais do deserto geralmente têm a mesma cor do seu substrato? Por que as aves insetívoras das zonas temperadas migram no outono para áreas subtropicais ou tropicais? Tais questões, em geral relacionadas com

adaptações ou com a diversidade orgânica, são tradicionalmente conhecidas como a busca das causas últimas. Perguntas do tipo “Por quê?” não se tornaram questões científicas antes da proposta da evolução e, mais particularmente, antes de 1859, quando Darwin propôs um mecanismo concreto para a mudança: a seleção natural.

Muito pouca gente se deu conta de que foi Darwin o responsável por dar legitimidade científica às perguntas do tipo “Por quê?”. E, ao fazer essas perguntas, ele fez toda a história natural ingressar no reino da ciência. Os fisicalistas, como Herschel e Rutherford, haviam excluído a história natural da ciência porque ela não se conformava aos princípios metodológicos da física. A natureza dos objetos inanimados, que não têm um programa genético historicamente adquirido, não pode ser elucidada por perguntas do tipo “Por quê?”. O que Darwin fez foi acrescentar uma importantíssima metodologia nova ao ferramental da ciência.

A terminologia das causas próximas e últimas tem uma longa história, talvez recuando até os tempos da teologia natural, quando “última” se referia à mão de Deus. Tem sido dito que Herbert Spencer falava de causas próximas e últimas, mas a referência mais antiga que consegui encontrar a essa terminologia está em uma carta que G. J. Romanes (1897: 98) escreveu a Darwin nos anos 1880: “Postular [...] movimentos moleculares [...] como a explicação completa da hereditariedade me parece a mesma coisa que dizer que a causa, digamos, de uma doença obscura como o diabetes é a persistência da força. Sem dúvida esta é a causa última, mas o patologista precisa de uma causa mais próxima se quiser que sua ciência tenha algum valor”.

Considerando quão vaga é essa formulação, não surpreende que tenham se passado mais quarenta anos até um uso mais bem definido ser introduzido na literatura por John Baker (1938: 162). É interessante citar na íntegra o uso que ele faz desses termos:

Os animais desenvolveram a capacidade de responder a certos estímulos por meio do acasalamento. Em climas frios e temperados, está geralmente claro que a estação adotada [para o acasalamento] permite aos filhotes crescer em condições climáticas favoráveis, e pode-se dizer que em certo sentido essas condições são a causa última de a temporada de acasalamento acontecer em uma dada época. Não há, é claro, razão nenhuma para supor que as condições ambientais específicas favoráveis aos filhotes sejam necessariamente aquela ou aquelas que constituem a causa próxima e estimulam os pais a se reproduzir. Assim, a abundância de insetos para comer pode ser a causa última, e a duração do dia pode ser a causa próxima, do período de acasalamento.

David Lack (em 1954) tomou emprestada essa terminologia de Baker, e eu (em 1961) a adotei de ambos os autores (mesmo embora, após Darwin, a causa última tenha passado a significar simplesmente a causa evolutiva). O conceito foi rapidamente detalhado por Orians (1962) e por alguns etólogos. Mesmo antes de 1961, biólogos sagazes entenderam bem que a biologia tem dois lados. Weiss (1947: 524), por exemplo, declarou: “Todos os sistemas biológicos têm um aspecto dual. Eles são mecanismos causais bem como produtos da evolução [...]. A fisiologia pode querer ficar do lado dos fenômenos repetitivos e controláveis e querer deixar a causa singular e não-repetitiva da evolução para outros”. Mas nem Weiss nem ninguém mais se aprofundou nessas sugestões até eu formular a distinção, em 1961.

Causas próximas estão relacionadas com a função de um organismo e com suas partes, bem como com seu desenvolvimento, investigado de sua morfologia funcional até a sua bioquímica. Elas lidam com a decodificação de programas genéticos e somáticos. As causas evolutivas (históricas ou últimas), por outro lado, tentam explicar por que um organismo é como é, como pro-

duto da evolução. Elas explicam a origem e a história dos programas genéticos. As causas próximas são geralmente a resposta a perguntas do tipo “Como?”, enquanto as causas últimas são geralmente a resposta a perguntas do tipo “Por quê?”.

Infelizmente, durante boa parte da história da biologia nos últimos 130 anos, foram feitos esforços para explicar os fenômenos biológicos exclusivamente em termos de uma ou outra dessas duas causações. Os experimentalistas diriam que o desenvolvimento se devia inteiramente a processos fisiológicos no embrião, enquanto os biólogos evolutivos ressaltariam que um ovo de peixe sempre se tornaria um peixe e um de rã se tornaria uma rã, e também que fenômenos como a recapitulação não fariam sentido a menos que os aspectos evolutivos fossem levados em conta. Muitas das grandes controvérsias da biologia no passado, como a disputa entre as escolas da natureza e da criação no tocante à herança e ao comportamento, ou a rebelião dos *Entwicklungsmechaniker* contra os embriologistas comparativos haeckelianos,¹¹ foram o resultado desse unilateralismo.

A eterna confusão entre questões relacionadas com causações próximas e últimas é particularmente aparente nos escritos dos chamados estruturalistas e dos morfólogos funcionais. Seu raciocínio básico é anti-selecionista e até teleológico; eles vêem lógica, ordem e racionalidade no domínio biológico.¹² O acaso, como princípio explicativo, é recebido com um franzir de cenho e sempre considerado uma alternativa a processos seletivos direcionais, não como um processo simultâneo. Considerações sobre os componentes “históricos” (evolutivos) dos fenômenos biológicos devem ser evitadas sempre que possível.¹³ Os estruturalistas não vêem que ambas as causações devem ser consideradas na maior parte das explicações biológicas, exceto aquelas puramente físico-químicas.

O reconhecimento de que a investigação biológica pode ser quebrada nessas duas questões tão diferentes ajudou a resolver

várias controvérsias conceituais na biologia, e levou ao esclarecimento metodológico (qual método usar e quando) e a uma demarcação mais clara entre várias disciplinas biológicas. Também chamou a atenção para o aspecto histórico das causas últimas e para os mecanismos fisiológicos envolvidos nas causas próximas, e demonstrou que a maioria dos biólogos são, em geral, estudiosos ou das causas últimas ou das causas próximas, devido à escolha de seu campo de trabalho. No entanto, como sempre insisti, nenhum fenômeno biológico pode ser inteiramente explicado até que tanto suas causas últimas quanto suas causas próximas sejam iluminadas. Mesmo que a maioria das disciplinas biológicas se concentre em um ou em outro desses conjuntos de questões, cada uma dessas disciplinas, em maior ou menor grau, precisa considerar também o outro tipo de causação.

Deixe-me ilustrar isso para a biologia molecular. Uma dada molécula tem um papel funcional em um organismo. Como ela desempenha esse papel, como interage com outras moléculas, seu papel no balanço energético da célula e assim por diante — essas questões resultam em um estudo das causas próximas. Mas quando perguntamos por que a célula contém essa molécula, que papel ela desempenhou na história da vida, como ela pode ter mudado durante a evolução, como e por que ela difere de moléculas homólogas em outros organismos e perguntas semelhantes, então estamos lidando com causas últimas. O estudo de ambas é igualmente legítimo e indispensável.

O estudo do comportamento animal é outra área que demonstra a conexão particularmente próxima entre os dois tipos de causação. Por que dado tipo de organismo demonstra dados componentes de comportamento é um resultado da evolução. Mas explicar a neurofisiologia de um comportamento específico requer um estudo das causas próximas, por meio de pesquisas neurofisiológicas.

As causas próximas podem afetar o fenótipo, isto é, a morfologia e o comportamento; as causas últimas podem ajudar a explicar o genótipo e sua história. As causas próximas são em grande parte mecânicas; as causas últimas são probabilísticas. As causas próximas ocorrem aqui e agora, em um momento particular, em um estágio particular do ciclo de vida de um indivíduo; as causas últimas têm estado ativas por longos períodos, mais especificamente no passado evolutivo de uma espécie. As causas próximas envolvem a decodificação de um programa genético ou somático existente; as causas últimas são responsáveis pela origem de novos programas genéticos e por suas mudanças. A determinação das causas próximas é geralmente facilitada pela experimentação, a das causas últimas, por inferências a partir de narrativas históricas.

Uma nova classificação baseada em “Como?” e “Por quê?”

Que classificação das ciências da vida seria possível adotar se fosse para dividi-las entre as causas próximas e as últimas somente com base em seu objetivo principal? Toda a fisiologia (a de órgãos, a de células, a sensoria, a neurofisiologia, a endocrinologia e assim por diante), a maior parte da biologia molecular, da biologia funcional, da biologia do desenvolvimento e da genética fisiológica se encaixam melhor nas causas próximas. A biologia evolutiva, a genética de transmissão, a etologia, a sistemática, a morfologia comparada e a ecologia se encaixam melhor nas causas últimas.

Essa tentativa de divisão rende de imediato algumas dificuldades, como a necessidade de partir a genética em genética de transmissão (e de populações) e a genética fisiológica, ou de dividir a morfologia entre funcional e comparada. No entanto, essas disciplinas já foram conceitualmente separadas há muito tempo, mesmo estando cobertas por um rótulo único. A morfologia funcional, por exemplo, é geralmente estudada por morfólogos des-

critivos, e estudiosos de filogenia fazem extenso uso de métodos moleculares. A ecologia é difícil de classificar; ela lida com sistemas complexos e, portanto, a maioria dos problemas ecológicos envolve tanto causas próximas quanto últimas. Quando, no século XIX, a teoria celular foi desenvolvida por Schleiden, Schwann e Virchow, ela era claramente um ramo da morfologia, e ainda o foi na alvorada da microscopia eletrônica. Mas a biologia celular moderna é praticamente biologia molecular.

TROCAS DE PODER NA BIOLOGIA

A reestruturação atual da biologia não poderia acontecer sem uma boa quantidade de tensão, controvérsia e deslocamentos. Sempre que uma nova subdisciplina se tornava bem-sucedida, ela lutava por seu lugar ao sol e tentava drenar o máximo possível de atenção e de recursos das disciplinas estabelecidas. Às vezes um novo campo estabelecia praticamente um monopólio. Quando obtive meu Ph. D. em Berlim, em 1926, vários zoólogos respeitáveis me aconselharam a partir para a *Entwicklungsmechanik*, se fosse para escolher a zoologia acadêmica como carreira. “Spemann preenche todas as cadeiras vagas”, eles me diziam. DuBois-Reymond nunca escondeu seu desprezo pela “zoologia descritiva” de seu professor Johannes Müller, mesmo que, olhando em retrospecto, as descobertas de sua própria pesquisa não tenham sido comparativamente tão impressionantes. A última vez que isso aconteceu foi quando a biologia molecular teve seu primeiro florescimento. O bioquímico George Wald proclamou em alto e bom som que só havia uma biologia, a biologia molecular; toda biologia é molecular, ele disse. Em várias universidades dos Estados Unidos, a maioria dos biólogos de organismos, ou todos eles, foi na época substituída por biólogos moleculares.

Com as ciências físicas tradicionalmente favorecidas com prêmios Nobel, em eleições para a Academia Nacional, em cargos consultivos no governo e pela indústria, as porções da biologia mais próximas do material e do pensamento das ciências físicas sempre foram favorecidas pelo governo, enquanto outros aspectos da biologia, como o estudo da biodiversidade, eram negligenciados. A origem dessa diversidade, um dos dois principais problemas da biologia evolutiva, era quase totalmente ignorada pela genética evolutiva antes da síntese evolucionista. A biologia médica, por razões óbvias, sempre foi favorecida pelas agências de fomento. Projetos equivalentes geralmente conseguem financiamentos muito maiores quando apoiados pelo Instituto Nacional de Saúde do que quando apoiados pela Fundação Nacional de Ciências.

A botânica, em especial, sofreu com essa discriminação. Nos tempos de Lineu, ela era a *scientia amabilis*, e até o começo do século xx havia vários botânicos entre os principais biólogos. Isso valia especialmente para a citologia e a ecologia. Todos os três redescobridores de Mendel, como eram chamados (DeVries, Correns e Tschermak), eram botânicos. Mas então uma série de derrotas teve início. O estudo dos fungos (micologia) foi removido da botânica e se tornou um campo independente; e, mais importante ainda, o mesmo aconteceu também com o estudo dos procariontes. Após 1910, os zoólogos, em sua maioria, haviam se tornado especialistas em citologia, genética, neurofisiologia, comportamento e assim por diante, e sentiam que estavam lidando com fenômenos biológicos básicos e quiseram ser chamados de biólogos em vez de zoólogos — uma palavra que, corretamente ou não, sempre pareceu ligada à morfologia e à taxonomia. A palavra “biológica” passou a ser usada com cada vez mais frequência para a combinação de botânica e zoologia. Por exemplo, em 1931, nos Laboratórios Biológicos de Harvard, foi estabelecido um Departamento de Biologia. Nesse novo departamento ainda havia profes-

sores que ensinavam matérias estritamente botânicas, como morfologia vegetal, fisiologia vegetal, taxonomia vegetal e biologia reprodutiva vegetal, mas agora eles se acotovelavam com outros biólogos, especializados em matérias zoológicas.

Quando o Instituto Americano de Ciências Biológicas (American Institute of Biological Science — AIBS) foi fundado, em 1947, ele incluía botânica, zoologia e todas as outras disciplinas biológicas. Os botânicos, no entanto, estavam com medo (não sem uma boa dose de razão) de que as características únicas das plantas fossem esquecidas se a consolidação da área na biologia fosse longe demais. Quando, em 1975, a Academia Nacional reorganizou suas subdivisões, a seção de zoologia foi abolida e substituída por uma seção de biologia de populações, evolução e ecologia. Os botânicos foram convidados a fazer o mesmo, mas preferiram preservar sua seção. Eles sustentaram que abandonar a seção de biologia vegetal levaria a negligenciar as propriedades únicas das plantas. Diversos botânicos, no entanto, saíram da seção de biologia vegetal e se juntaram a seções biológicas gerais como a de genética ou a de biologia de populações.¹⁴

Mas a botânica não foi de forma alguma obliterada. Ela assumiu a liderança, por exemplo, no estudo da biologia tropical. Os herbários e os periódicos botânicos continuam a dar contribuições importantes à biologia, e os departamentos de botânica ainda são ativos em muitas faculdades e universidades. Com efeito, na onda do atual movimento conservacionista, a botânica hoje voltou a ser mais produtiva do que era no período anterior.

Quase invariavelmente os representantes de uma tradição, os fundadores de uma nova disciplina, acham que ela torna obsoleta alguma das divisões clássicas da biologia. Na verdade, mesmo os ramos mais tradicionais da biologia — a sistemática, a anatomia, a embriologia e a fisiologia — ainda são necessários, não só como bancos de dados, mas também pelo fato de todos eles serem fron-

teiras infinitas e inacabadas, e de todos serem necessários para completar a nossa visão do mundo vivo. Cada disciplina parece ter uma época áurea, e muitas delas têm várias. Mas, mesmo depois de a lei de retornos decrescentes* ter predominado, não há justificativa para abolir uma disciplina que tenha se tornado “clássica”.¹⁵

BIOLOGIA, UMA CIÊNCIA DIVERSIFICADA

Os capítulos 1 e 2 enfatizaram as características e os conceitos distintivos da biologia quando comparada com as ciências físicas, a teologia, a filosofia e as humanidades. Quase tão importantes são as diferenças conceituais que existem dentro da própria biologia. Cada ramo da biologia tem seus próprios bancos de dados, seu próprio conjunto de teorias, seus próprios livros-texto, periódicos e suas próprias sociedades científicas. Claro, há semelhanças entre as disciplinas biológicas que lidam com causas próximas, assim como as que se especializam em causas últimas, mas mesmo estas diferem de maneira notável na natureza de suas teorias dominantes e de seus conceitos fundamentais.

Para fazer tal análise para todas as áreas especiais da biologia, seria preciso muito mais espaço do que o disponível neste volume, e seria exceder em muito minha competência. O que tentarei fazer nos capítulos que se seguem, no entanto, é uma análise de amostras de quatro áreas — sistemática, biologia do desenvolvimento, evolução e ecologia —, de modo a ilustrar a natureza da disputa entre conceitos rivais e a relativa maturidade do arcabouço conceitual atual dessas áreas.

* Lei de retornos decrescentes: princípio da economia segundo o qual o investimento contínuo de energia e talento em uma tarefa qualquer tende a produzir menos resultados depois que se atinge certo patamar. (N. T.)

Mas, antes de embarcar nessa tarefa, talvez eu devêsse elaborar sobre uma questão colocada no prefácio — minhas razões para não incluir algumas disciplinas na minha análise. Algumas disciplinas biológicas se relacionam com tudo o que diga respeito aos organismos vivos. Isso é certamente verdade para a genética. O programa genético é o fator subjacente a tudo o que os organismos fazem. Ele tem um papel decisivo no estabelecimento da estrutura de um organismo, de seu desenvolvimento, de suas funções e suas atividades.

Didaticamente, a maneira mais informativa de lidar com os conceitos da genética seria usar a história da genética como o veículo. Tentei fazer isso no meu *O desenvolvimento do pensamento biológico*. Mas ali só lidei com a genética de transmissão. Devido à ascensão da biologia molecular, a ênfase agora mudou para a genética do desenvolvimento, e esse tipo de genética virtualmente se tornou um ramo da biologia molecular.

Mais formidáveis, e talvez mais intransponíveis, são os problemas colocados pela biologia molecular. Quer tratemos de fisiologia, desenvolvimento, genética, neurobiologia ou comportamento, os processos moleculares são em última instância os responsáveis por tudo o que acontece. Alguns fenômenos unificadores já são aparentes, como os homeoboxes; outros podem ser fracamente distinguíveis. Mas todas as vezes que tentei apresentar uma visão panorâmica da biologia molecular fui atropelado por uma massa de detalhes. Por essa razão, nenhuma seção especial deste livro será dedicada à biologia molecular, embora nos capítulos 8 e 9 eu tenha destacado algumas grandes generalizações (“leis”) descobertas pelos biólogos moleculares. A razão pela qual não dediquei mais espaço a essa disciplina não é que a considere menos importante que outras partes da biologia — pelo contrário —, mas que seu tratamento requer uma competência que não tenho. O mesmo vale para a neurobiologia e a psi-

cologia, que também são demasiado importantes. No entanto, espero que meu tratamento da biologia como um todo possa lançar alguma luz sobre os ramos da biologia que não são cobertos em detalhe neste volume.

7. Perguntas do tipo “O quê?”: o estudo da biodiversidade

O aspecto mais impressionante do mundo vivo é a sua diversidade. Não existem dois indivíduos iguais em populações que se reproduzem sexuadamente, nem duas populações, espécies ou táxons mais elevados que sejam iguais. Para onde quer que olhe-mos na natureza, encontramos singularidade.

Nosso conhecimento sobre a diversidade da vida cresceu exponencialmente nos últimos trezentos anos. Tal ampliação no conhecimento começou com as viagens de exploração e com o trabalho de exploradores individuais, cujos registros de observações e coleções revelaram diferenças na fauna e na flora de todos os novos continentes e ilhas explorados. Em seguida veio o estudo de organismos de água doce e marinhos, incluindo os das profundezas do mar, que revelaram uma outra dimensão da biodiversidade. As pesquisas com plantas e animais microscópicos, parasitas e fósseis nos levaram a conhecer ainda mais as singularidades da biota da Terra. Finalmente vieram a descoberta e o estudo científico dos procariontes (bactérias e seus parentes), tanto vivos quanto fósseis. O campo de pesquisas específico que

tem como missão descrever e classificar a vasta diversidade da natureza se chama taxonomia.

Depois de uma explosão inicial do interesse na classificação por Aristóteles e Teofrasto, por volta de 330 a. C., a taxonomia viveu um longo declínio, que durou até a Renascença. O campo teve um segundo grande florescimento através do trabalho de Lineu (1707-78), seguido de outro declínio, que só foi interrompido quando Darwin publicou seu *A origem das espécies*, em 1859.¹ Esse trabalho era essencialmente resultante de pesquisa taxonômica, e a taxonomia continuou a desempenhar um papel importante no desenvolvimento da teoria evolutiva, fornecendo a base para o conceito biológico de espécie e para grandes teorias da especiação e da macroevolução (ver abaixo).

Percebendo que a tarefa de estudar a biodiversidade era muito mais que mera descrição e a realização de inventários, Simpson sugeriu que o termo "taxonomia" ficasse restrito aos aspectos tradicionais da classificação, enquanto o termo "sistemática" fosse aplicado "ao estudo científico dos tipos e da diversidade dos organismos, e a todo e qualquer relacionamento entre eles". A sistemática, assim, foi concebida como a ciência da diversidade, e esse novo conceito, mais amplo, foi extensamente adotado pelos biólogos.²

A sistemática inclui não só a identificação e a classificação, mas também o estudo comparativo de todas as características das espécies, bem como uma interpretação do papel de táxons inferiores e superiores na economia da natureza e na história evolutiva. Muitos ramos da biologia dependem inteiramente da sistemática; entre eles estão a biogeografia, a citogenética, a oceanografia biológica, a estratigrafia e algumas áreas da biologia molecular.³ A sistemática é uma síntese de muitos tipos de conhecimentos, teorias e métodos aplicados a todos os aspectos da classificação. A tarefa do sistemata, em última instância, não é meramente descrever a diversidade do mundo vivo, mas também contribuir para o seu entendimento.⁴

A CLASSIFICAÇÃO NA BIOLOGIA

Na vida cotidiana, é possível lidar com uma grande quantidade de itens bem diferentes entre si simplesmente ao classificá-los. As classificações são usadas para ordenar ferramentas, remédios e obras de arte, bem como para teorias, conceitos e idéias. Quando classificamos, agrupamos objetos em classes de acordo com seus atributos comuns. Uma classe, portanto, é uma junção de entidades semelhantes e relacionadas umas com as outras.

Todo sistema classificatório tem duas funções principais: facilitar a obtenção de informações e servir de base para pesquisas comparativas. A classificação é a chave para o sistema de armazenamento de informações em qualquer área. Na biologia, esse sistema de armazenamento de informações consiste em coleções de museu e na vasta literatura científica em livros, periódicos e outras publicações. A qualidade de qualquer esquema de classificação é julgada pela capacidade desse sistema de facilitar o armazenamento de informações em divisões relativamente homogêneas e permitir a descoberta e a recuperação rápida de informações. Classificações são sistemas heurísticos.

Considerando que classificar sempre foi uma atividade humana, que começou com nossos ancestrais mais primitivos, é surpreendente verificar quanta incerteza e quanto desacordo ainda existem sobre a natureza da classificação. E, considerando quão importante é o processo de classificar nas várias áreas da ciência, é curioso ver como os filósofos da ciência após Whewell (1840) têm menosprezado esse tema. No entanto, qualquer um que tente classificar os organismos pode derivar algumas regras elementares de atividades humanas cotidianas, como classificar livros numa biblioteca ou mercadorias numa loja: (1) Os itens a serem classificados deverão ser arranjados em classes que sejam as mais homogêneas possíveis. (2) Um item individual é incluído na

classe com cujos membros ele compartilhe o maior número de atributos. (3) Uma classe separada é estabelecida para qualquer item que seja diferente demais para ser incluído em uma das classes preestabelecidas. (4) O grau de diferença entre as classes é expresso quando as agrupamos em uma hierarquia crescente de subconjuntos. Cada nível categórico nessa hierarquia representa certo grau de diferença. Essas regras também se aplicam à classificação dos organismos, embora no mundo vivo sejam necessárias algumas regras adicionais.

Considerando quão indispensável a pesquisa taxonômica é para muitos ramos da biologia, se não para todos eles, é surpreendente o quanto ela tem sido negligenciada e desprestigiada recentemente. O método principal em muitas disciplinas biológicas é a comparação, e no entanto nenhuma comparação leva a conclusões que tenham sentido se não for baseada em boa taxonomia. Com efeito, não há nenhum ramo da biologia comparada — desde a anatomia comparada e da fisiologia comparada até a psicologia comparada — que não seja, em última instância, completamente baseado em taxonomia.

Os múltiplos papéis da taxonomia na biologia podem ser resumidos da seguinte forma: (1) É a única ciência que fornece um quadro da diversidade orgânica existente na Terra. (2) Fornece a maior parte da informação necessária para reconstituição da filogenia da vida. (3) Revela diversos fenômenos evolutivos interessantes e os disponibiliza para estudos causais feitos por outros ramos da biologia. (4) Fornece quase exclusivamente a informação necessária para ramos inteiros da biologia (como a biogeografia e a estratigrafia). (5) Proporciona sistemas de ordenação ou classificações que são de grande valor heurístico ou explicativo para a maioria dos ramos da biologia, como a biologia evolutiva, a imunologia, a ecologia, a genética, a etologia e a geologia histórica. (6) Através de seus maiores expoentes, a sistemá-

tica deu contribuições conceituais importantes, como o pensamento populacional (ver o capítulo 8), contribuições essas que não seriam de outra forma facilmente acessíveis aos biólogos experimentais. Esses aportes conceituais ampliaram a biologia de forma significativa e levaram a um melhor equilíbrio na ciência biológica como um todo.

O taxonomista põe ordem na estonteante diversidade da natureza em dois passos. O primeiro é a discriminação das espécies, esforço conhecido como *microtaxonomia*. O segundo é a classificação dessas espécies em grupos relacionados, uma atividade chamada *macrotaxonomia*. Conseqüentemente, a taxonomia, que é a combinação de ambas, foi definida por Simpson (1961) como sendo “a teoria e a prática de delimitar tipos de organismos e classificá-los”.

MICROTAXONOMIA: A DEMARCAÇÃO DAS ESPÉCIES

O reconhecimento, a descrição e a delimitação das espécies é uma atividade bem distinta de outros objetivos da taxonomia. Trata-se de uma área repleta de dificuldades semânticas e conceituais, em geral chamadas de “o problema da espécie”. O termo “espécie” significa simplesmente “tipo de organismo”, mas, como a variação é onipresente no mundo vivo, é preciso definir precisamente o que se quer dizer com “tipo”. Um macho e uma fêmea também são tipos diferentes de organismo, como o são crianças e adultos. Enquanto se acreditou que cada espécie havia sido criada separadamente, a crença era que uma espécie consistia nos descendentes do primeiro par originalmente criado por Deus.

Os naturalistas que lidavam com organismos superiores, como aves e mamíferos, raramente tinham dúvidas sobre o que era uma espécie. Para eles, uma espécie era simplesmente um grupo de organismos diferente de outros grupos, onde “diferente” signifi-

cava distinto em características morfológicas visíveis. Esse conceito de espécie foi adotado amplamente, quase universalmente mesmo, até o último terço do século XIX. Organismos que diferiam em um grau menor que o de espécie foram chamados de variedades por Lineu e até por Darwin. Esse conceito de espécie ficou conhecido como o conceito tipológico ou essencialista de espécie (e, incorretamente, como conceito morfológico de espécie).

O conceito tipológico de espécie postulava quatro características das espécies: (1) Uma espécie consiste em indivíduos que compartilham a mesma “essência”. (2) Cada espécie é separada de todas as outras por uma descontinuidade marcada. (3) Cada espécie é constante através do espaço e do tempo. (4) A variação possível dentro de qualquer espécie específica é bastante limitada. Os filósofos se referem a tais espécies concebidas de maneira essencialista como “tipos naturais”.

No decorrer do século XIX, a fraqueza desse conceito de espécie tipológico ou essencialista se tornou cada vez mais aparente. Darwin refutou conclusivamente a noção de que as espécies são constantes. Os estudos da variação geográfica e, particularmente, a análise de amostras de populações locais confirmaram que as espécies são compostas de populações que variam de um lugar para outro e cujos indivíduos variam dentro de determinada população. Tipos ou essências não existem na natureza.

Além dessas objeções conceituais ao conceito tipológico de espécie, havia também a objeção, puramente prática, de que ele geralmente não ajudava em nada na delimitação dos táxons. A variação morfológica existente em populações que se cruzam entre si, e de uma população a outra dentro do mesmo “tipo”, muitas vezes era maior que as diferenças entre populações morfológicamente semelhantes que não se cruzam. Portanto, um critério puramente morfológico não era confiável para delimitar uma espécie. Para piorar ainda mais as coisas, aconteceu a descoberta

das espécies-gêmeas, ou seja, populações naturais que estão isoladas reprodutivamente (não são capazes de se cruzar devido a barreiras fisiológicas ou de comportamento), mas que não são distinguíveis umas das outras morfológicamente. Tais populações já foram encontradas em quase todos os táxons superiores de animais, e ocorrem também em plantas. Tornou-se necessário buscar um critério diferente para delimitar as espécies, e tal critério foi encontrado no isolamento reprodutivo das populações.

Desse critério que leva em conta o não-cruzamento veio o chamado conceito biológico de espécie. Uma espécie, de acordo com esse conceito, é um grupo de populações naturais que se cruzam entre si que é reprodutivamente (geneticamente) isolado de outros grupos semelhantes por causa de barreiras fisiológicas ou de comportamento. A única maneira de entender completamente quão apropriado é o conceito biológico de espécie é fazer perguntas darwinistas do tipo “Por quê?": Por que existem espécies? Por que não encontramos na natureza simplesmente um contínuo ininterrupto de indivíduos semelhantes ou mais amplamente divergentes, mas todos em princípio aptos a se acasalar uns com os outros? O estudo dos híbridos dá essa resposta. Se os pais não são da mesma espécie (como no caso de cavalos e asnos, por exemplo), sua cria (os burros) consistirá em híbridos que geralmente são mais ou menos estéreis e têm viabilidade reduzida, ao menos na segunda geração. Portanto, há uma vantagem seletiva em qualquer mecanismo que favoreça o cruzamento entre indivíduos que são mais proximamente relacionados (chamados de conspecíficos) e impeça o cruzamento entre indivíduos mais distantemente relacionados. Isso é obtido por meio do isolamento reprodutivo das espécies. Uma espécie biológica, portanto, é uma instituição para a proteção e o equilíbrio dos genótipos.

O conceito biológico de espécie é chamado de “biológico” porque dá uma razão biológica para a existência de espécies entre os

organismos — a saber, a prevenção da endogamia entre indivíduos incompatíveis. É apenas incidental que uma espécie possa também ter outras propriedades, como a ocupação de um nicho ecológico separado e certas características morfológicas ou comportamentais espécie-específicas, que a distinguem de outras espécies.⁵

Uma grande razão para a aceitação quase universal do conceito biológico de espécie é a sua utilidade para a maior parte das áreas da pesquisa biológica. Os ecólogos, os estudiosos do comportamento, os estudiosos da biota local e mesmo os fisiologistas e biólogos moleculares se interessam pelos tipos de população que podem coexistir sem intercruzamento. Em muitos casos, os estudiosos dos organismos vivos reconhecem as espécies não pelos critérios morfológicos, mas por aspectos de seu comportamento, por sua história de vida ou pelas suas moléculas.

A definição biológica de espécie pode ser aplicada sem dificuldade sempre que populações em condições de acasalar coexistem no mesmo local. Ela encontra dificuldades, porém, sob dois tipos de circunstância. O primeiro é o caso dos organismos que se reproduzem uniparentalmente (assexuados), que não têm populações e não se intercruzam.

O segundo problema com a aplicação do conceito biológico de espécie à delimitação das espécies é o fato de que populações dentro de uma espécie raramente estão confinadas a uma localização geográfica limitada. Em vez disso, elas com frequência se estendem por um território cujo tamanho varia. Quando tais populações são visivelmente distintas uma da outra, elas são em geral reconhecidas como subespécies. As subespécies são partes de uma série contínua de populações e, como tais, frequentemente se cruzam e trocam genes. Mas muitas subespécies são geograficamente isoladas e não têm oportunidades de troca gênica. Como resultado, elas acabam divergindo morfológicamente. Com o tempo, essas subespécies podem chegar a adquirir o status de espécie com-

pleta, porque adquiriram um novo conjunto de mecanismos de isolamento. Uma espécie que consiste em um grande número de subespécies é chamada de espécie politípica. Espécies que não se dividem em subespécies são chamadas de monotípicas.

Quando algumas das populações mais distantes se isolam geograficamente por completo de todas as outras populações de uma espécie, surge a pergunta: Essas populações isoladas ainda são membros da espécie-mãe? Que critérios podem ser usados para decidir quais dessas populações reconhecer como espécies completas e quais delas combinar em uma espécie politípica? O status de espécie de populações geograficamente isoladas pode ser determinado apenas por inferência, particularmente pelo grau de diferença morfológica.⁶

O conceito biológico de espécie demorou para ser estabelecido. Buffon entendeu sua essência⁷ e Darwin, em seus Cadernos da Transmutação, disse que o status de espécie “é simplesmente um impulso instintivo para se manter separado”. Ele se referiu à “repugnância mútua” das espécies ao intercruzamento e assinalou que algumas espécies verdadeiras poderiam “quase não diferir em suas características externas”, ou seja, que o status de espécie tinha pouco ou nada a ver com o grau de diferença morfológica. Curiosamente, em seus escritos posteriores, Darwin desistiu do conceito biológico e retornou a um conceito bastante tipológico.

Na segunda metade do século XIX e no primeiro terço do XX, mais e mais naturalistas se referiam às espécies nos termos de suas características biológicas. Mesmo que eles não tivessem proposto uma definição formal, autores como Poulton, K. Jordan e Stresemann evidentemente acatavam um conceito biológico de espécie. No entanto, este não foi amplamente aceito até que eu propusesse uma definição formal em 1940 e fornecesse evidências maciças em favor de um conceito biológico de espécie em meu livro de 1942, *Systematics and the origin of species*.

O que ajudou na aceitação do conceito biológico de espécie mais do que tudo foi a fragilidade dos conceitos concorrentes. Estes incluíam o conceito nominalista de espécie, o conceito evolutivo de espécie, o conceito filogenético de espécie e o conceito de reconhecimento de espécie. Nenhum deles era prático como o conceito biológico para delimitar uma espécie, embora cada um deles tenha ainda hoje certo número de apoiadores.

Os conceitos concorrentes de espécie

De acordo com o conceito nominalista de espécie, apenas os indivíduos existem na natureza, e as espécies são uma construção humana. Ou seja, uma pessoa (e não a natureza) produz as espécies, ao agrupar indivíduos sob um nome. Mas tal arbitrariedade não é consubstanciada pela situação que de fato se encontra em qualquer exploração do mundo natural. Um naturalista que vê, por exemplo, as quatro espécies comuns de chapim nas matas britânicas, ou as espécies comuns de felosa-assobiadeira em uma floresta da Nova Inglaterra, sabe que não há nada de arbitrário nas barreiras entre as espécies, e sim que essas espécies são produtos da natureza. Para mim, nada traduz isso melhor que o fato de que os nativos da Nova Guiné, que vivem ainda na Idade da Pedra, discriminam e batizam exatamente as mesmas espécies que são distinguidas pelos naturalistas do Ocidente. É preciso uma ignorância enorme tanto dos organismos vivos quanto do comportamento humano para adotar o conceito nominalista de espécie.

O conceito evolutivo de espécie tem sido proposto especialmente por paleontólogos, que seguem as espécies através da dimensão do tempo. De acordo com a definição de Simpson (1961: 153), “Uma espécie evolutiva é uma linhagem (uma linhagem de populações ancestrais e descendentes) que evolui separadamente de outras e que tem seu próprio papel evolutivo unitário

e suas próprias tendências evolutivas”. O principal problema dessa definição é que ela se aplica igualmente a quase todas as populações isoladas. Além disso, a linhagem não é uma população. Mais ainda, ela contorna a questão crucial do que vem a ser um “papel unitário” e de por que as linhagens filéticas não se cruzam umas com as outras. Finalmente, esse conceito falha em seu objetivo, o de delimitar os táxons de espécie na dimensão do tempo, porque, em uma única linhagem filética que evolui gradualmente, o conceito evolutivo de espécie não permite determinar em que momento uma espécie começa e em que momento ela acaba, nem qual parte dessa linhagem tem um “papel unitário”. A definição evolutiva de espécie ignora o fulcro do problema das espécies: a causa e a manutenção das descontinuidades entre espécies contemporâneas. Ela é mais uma tentativa de demarcar os táxons de espécies fósseis, mas falha até nessa missão.

A definição evolutiva de espécie ignora o fato de que há dois processos pelos quais uma nova espécie pode se originar: (1) a transformação gradual de uma linhagem filética em uma espécie diferente sem que o número de espécies mude; (2) a multiplicação das espécies na dimensão horizontal (espaço) por meio do isolamento geográfico (como Darwin viu nas ilhas Galápagos). As dificuldades que um taxonomista encontra são quase invariavelmente causadas por esta última — a multiplicação das espécies na dimensão horizontal (espaço) em vez da transformação das espécies na dimensão vertical (tempo). A definição biológica de espécie aborda especificamente o problema da multiplicação das espécies, ao passo que a definição evolutiva o ignora, lidando apenas com a evolução filética. Ordinariamente, quando falamos de especiação, nos referimos à multiplicação das espécies.

De acordo com o conceito filogenético de espécie, adotado por muitos cladistas (ver adiante), uma nova espécie se origina quando uma nova “apomorfia” se origina em uma população qualquer. Essa

apomorfia pode ser tão pequena quanto uma mutação em um único gene. Ao descobrir que as espécies de peixe em quase qualquer tributário dos rios da América Central tinham genes localmente endêmicos, Rosen propôs que todas essas populações com genes endêmicos fossem elevadas ao nível de espécie.⁸ Um de seus críticos destacou corretamente que, com a alta frequência de mutações genéticas neutras, cada indivíduo pode diferir de seus pais em pelo menos um gene. Como é que alguém poderia decidir quando uma população é diferente o bastante a ponto de poder ser considerada uma espécie distinta? Essa observação mostrou de forma clara o absurdo que é tentar aplicar os conceitos de cladística da macrotaxonomia ao problema das espécies (mais sobre a cladística adiante).

O conceito de reconhecimento de espécie, proposto por H. Paterson, não é nada senão uma versão diferente do conceito biológico de espécie — que Paterson não entendeu direito.⁹

Conceito de espécie, categoria espécie e táxons de espécie

A palavra “espécie” se aplica a três objetos ou fenômenos muito diferentes: (1) o conceito de espécie, (2) a categoria espécie, (3) os táxons de espécie. A confusão sem fim na literatura resulta do fracasso de alguns autores em discriminar entre esses três sentidos tão diferentes da palavra “espécie”.

O conceito de espécie é o significado ou definição biológica da palavra “espécie”. A categoria espécie é um nível particular na hierarquia lineana — a hierarquia tradicional na qual os organismos são colocados. Cada nível dessa hierarquia (como espécie, gênero, ordem e assim por diante) é chamado de categoria. Para determinar se uma população pertence à categoria espécie, é preciso testá-la levando em conta a definição de espécie. Os táxons de espécie são as populações específicas ou grupos de populações que satisfazem a definição de espécie; eles são particulares (“indi-

víduos”) e, assim, não podem ser definidos, apenas descritos e demarcados um em relação ao outro.

Na época de Lineu, a identificação das espécies era primariamente uma preocupação dos taxonomistas, mas esse não é mais o caso. Os biólogos evolutivos hoje sabem que a espécie é a entidade fundamental da evolução. Cada espécie é um experimento biológico, e não há maneira de prever, no que diz respeito a uma nova espécie, se o novo nicho que ela passa a ocupar é um beco sem saída ou a entrada de uma grande nova zona adaptativa. Ainda que os evolucionistas falem em fenômenos amplos como tendências, adaptações, especializações e regressões, tais fenômenos não podem ser separados do progresso das entidades que manifestam essas tendências, as espécies. Devido ao seu isolamento reprodutivo, qualquer processo evolutivo que aconteça em uma espécie é restrito a essa espécie e a seus descendentes. É por isso que a espécie é a moeda da mudança evolutiva.

A espécie também é, em grande parte, a unidade básica da ecologia. Nenhum ecossistema pode ser entendido completamente enquanto não for dissecado em suas espécies componentes e enquanto as diversas interações entre essas espécies não forem compreendidas. Uma espécie, independentemente dos indivíduos que a compõem, interage como uma unidade com outras espécies com as quais ela compartilha o ambiente.

No caso dos animais, as espécies são também unidades importantes para as ciências do comportamento. Membros de uma espécie compartilham muitos padrões de comportamento espécie-específicos, em especial todos os que têm a ver com comportamento social. Os indivíduos que pertencem à mesma espécie compartilham os mesmos sistemas de sinalização no seu comportamento de corte, por exemplo, e os sistemas de comunicação também são espécie-específicos. Nas espécies olfativas isso inclui a posse de feromônios espécie-específicos.

A espécie representa um nível importante na hierarquia dos sistemas biológicos. Ela é um dispositivo de ordenamento imensamente útil para muitos fenômenos biológicos significativos. Mesmo que não haja um nome para a “ciência das espécies” (comparável, por exemplo, ao nome “citologia” para a ciência das células), não há dúvida de que tal ciência existe e de que ela é uma das áreas mais ativas da biologia moderna.

MACROTAXONOMIA: A CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES

O ramo da taxonomia que lida com a classificação (ou agrupamento) dos organismos acima do nível de espécie é chamado de macrotaxonomia. Felizmente, a maioria das espécies parece cair em grupos naturais mais elevados e facilmente reconhecíveis, como os mamíferos e as aves ou as borboletas e os besouros. Mas o que fazer com as espécies que parecem ser intermediárias entre os grupos ou que não parecem pertencer a grupo algum?

No decorrer da história da taxonomia, muitas propostas de métodos e princípios de classificação dos organismos foram feitas. As classificações resultantes desses princípios às vezes tinham objetivos diferentes, e esta talvez seja a razão pela qual mesmo hoje não há consenso entre os taxonomistas sobre qual seja o “melhor” método de classificação.

Classificação de cima para baixo

A classificação de cima para baixo foi o método dominante quando a botânica médica prosperou, durante a Renascença e depois dela. Seu objetivo primordial era a identificação de diferentes tipos de plantas e animais. Naquela época, o conhecimento das espécies tanto na botânica quanto na zoologia ainda era muito pri-

mitivo, e mesmo assim de vital importância para a correta identificação das plantas que tinham propriedades curativas conhecidas.

A classificação de cima para baixo começa com a divisão das classes em subgrupos, através do uso do método de divisão lógica de Aristóteles. Os animais são ou de sangue quente ou de sangue frio; isso produz duas classes. Os animais de sangue quente ou são peludos ou têm penas, e cada uma das classes resultantes (mamíferos e aves) pode ser novamente subdividida por um processo de dicotomia até que finalmente se chegue à espécie determinada à qual pertence o espécime que se estava querendo identificar.

Os princípios da classificação de cima para baixo dominaram a taxonomia até o final do século XVIII e se refletem nas chaves e nas classificações propostas por Lineu. O método é usado ainda em guias de campo e nas chaves das revisões taxonômicas, exceto pelo fato de que hoje não é mais chamado de classificação, e sim de identificação.

Os esquemas de identificação tinham um grande número de fraquezas sérias, que impediam que eles fossem úteis como esquemas verdadeiros de classificação. Eles se fiavam inteiramente em caracteres únicos (um “caractere” em biologia é um traço ou atributo distintivo, aquilo que chamaríamos de característica na linguagem do dia-a-dia), e a seqüência de caracteres arbitrariamente escolhida pelo taxonomista controlava as classes produzidas pelas sucessivas divisões. Qualquer aprimoramento gradual de tal classificação era quase impossível, e a escolha de certos caracteres algumas vezes resultava em grupos altamente heterogêneos (“não-naturais”).

As pessoas, claro, já reconheciam havia muito tempo grupos naturais como os peixes e os répteis, as samambaias, os musgos e as coníferas. Perto do fim do século XVIII, foram feitos esforços para substituir o esquema em grande parte artificial de Lineu por um sistema mais natural, baseado em similaridades e relaciona-

mentos comumente observados. Mas havia grande incerteza sobre como determinar tais critérios.

Classificação de baixo para cima

A partir de 1770, mais ou menos, mesmo Lineu e outros taxonomistas, como Adanson, promoveram a classificação de baixo para cima como uma abordagem mais apropriada. A classificação de baixo para cima equivale a juntar as espécies em grupos (táxons) que consistem em espécies similares ou relacionadas. Os mais semelhantes entre si dentre esses táxons recém-formados são então combinados em um táxon mais elevado do próximo nível mais alto, até que uma hierarquia completa dos táxons esteja formada. Esse método era simplesmente a aplicação dos métodos cotidianos de classificação ao agrupamento de espécies de organismos.

Mas os proponentes da classificação de baixo para cima não foram capazes de desenvolver uma metodologia rigorosa. Ainda havia uma tendência a dar um peso especial a caracteres únicos muito conspícuos, e não havia nenhuma teoria para dar conta da existência de grupos razoavelmente bem definidos e da existência de uma hierarquia entre os táxons. Cada taxonomista desenvolvia mais ou menos sua própria metodologia.

Os anos de 1770 até 1859 foram um período de transição. O método de classificação de cima para baixo foi claramente abandonado, mas a classificação de baixo para cima não tinha uma metodologia bem articulada e muitas vezes foi empregada de forma arbitrária. Uma subcategoria de classificação de baixo para cima foi desenvolvida durante essa época. Ela consistia nas chamadas classificações de propósito especial. Tais classificações não se baseavam na totalidade dos caracteres, mas, em nome de um propósito especial, se baseavam somente em um ou em um número

restrito de caracteres. Por exemplo, os cogumelos podem ser classificados, para propósitos culinários, em comestíveis e não-comestíveis (venenosos). As classificações de propósito especial remontam a Teofrasto, que distinguiu as plantas de acordo com seu padrão de crescimento em árvores, arbustos, ervas e gramas. As classificações de propósito especial ainda são úteis na ecologia. Por exemplo, um limnólogo pode dividir os organismos planctônicos em autótrofos, herbívoros, predadores e comedores de detritos. Todos esses sistemas têm um conteúdo informativo mais baixo que um sistema darwinista de classificação.

Classificação evolutiva ou darwinista

No brilhante capítulo 13 de *A origem das espécies*, Darwin sossegou todas essas inquietudes taxonômicas ao mostrar que um sistema sólido de classificação dos organismos precisa se basear em dois critérios: genealogia (origem comum) e grau de semelhança (quantidade de mudança evolutiva). Uma classificação baseada nesses dois critérios é conhecida como um sistema de classificação evolutivo ou darwinista.

Filósofos e classificadores práticos já haviam percebido havia muito tempo que se existirem teorias explicativas (causais) para o agrupamento dos objetos, então essas explicações devem ser levadas em conta na delimitação de tais grupos. E, com efeito, as classificações das doenças humanas prevalentes no século XVIII foram substituídas nos séculos XIX e XX por sistemas baseados na etiologia dessas doenças. Elas passaram a ser classificadas em doenças causadas por agentes infecciosos, por genes defeituosos, pela idade, por malignidade, por substâncias tóxicas ou radiação nociva, e assim por diante. Qualquer classificação que leve em conta a causa está sujeita a limitações que a impedem de se tornar um sistema puramente artificial.

Tão logo Darwin desenvolveu sua teoria da origem comum, ele se deu conta de que cada "táxon" (ou grupo distinto de organismos) natural consiste nos descendentes do ancestral comum mais próximo; tal táxon é chamado de monofilético.¹⁰ Se um sistema de classificação se baseia estrita e exclusivamente na monofilia dos táxons nele incluídos, ele é um sistema de ordenamento genealógico.

Mas Darwin enxergou muito claramente que a genealogia, "por si só, não produz a classificação". Classificar organismos exclusivamente com base na genealogia é, de certa forma, apenas uma classificação de propósito especial. O critério da ascendência, para Darwin, não era um substituto do critério da similaridade, mas uma maneira de delimitar os tipos de similaridade que poderiam ser aceitos como evidência para estabelecer uma relação. A razão pela qual a similaridade não pode ser negligenciada é que os ramos divergentes da árvore filogenética "sofrem graus diferentes de modificação", e isso "se expressa ao se ordenarem as formas em diferentes gêneros, famílias, seções ou ordens" (Darwin 1859: 420). Em outras palavras, o grau de diferença que surge durante a divergência filogenética deve ser rigorosamente considerado no ato de delimitar e ordenar os táxons, de modo a produzir uma classificação verdadeira. Uma classificação darwinista sólida, assim, deve ser baseada em uma consideração equilibrada de genealogia e similaridade (grau de diferença).

Para compreender o papel da similaridade na classificação darwinista é preciso entender o conceito de homologia. O relacionamento entre as espécies e os táxons mais elevados é indicado pela existência de caracteres homólogos. Um traço em dois ou mais táxons é homólogo quando é derivado filogeneticamente do mesmo traço (ou de um traço correspondente) no ancestral comum mais próximo. Muitos tipos de evidência podem ser usados para inferir a homologia. Entre eles estão a posição da estrutura em relação a estruturas vizinhas; a conexão entre dois estágios

diferentes por um estágio intermediário em uma forma aparentada; a similaridade na ontogenia; a existência de condições intermediárias em ancestrais fósseis; e o estudo comparativo de táxons monofiléticos relacionados.¹¹

Mas nem todas as semelhanças entre organismos resultam de homologia. Três tipos de mudanças de caracteres durante a evolução podem imitar a homologia; eles são geralmente agrupados sob o termo homoplasia. São eles a convergência, o paralelismo e a reversão. A convergência é a aquisição independente de um mesmo traço em linhagens não aparentadas evolutivamente, como o desenvolvimento de asas tanto em aves quanto em morcegos. O paralelismo é a realização independente de um caractere em duas linhagens relacionadas devido a uma predisposição genética para esse caractere, mesmo que ele não tenha se expressado fenotipicamente no ancestral comum. Um exemplo famoso é a aquisição independente de olhos em haste em um grupo de moscas. A reversão é a perda independente do mesmo caractere avançado em várias linhagens filogenéticas. Uma análise genealógica permite desemaranhar essas semelhanças em determinado grupo de organismos e remover de um táxon as espécies (ou os táxons mais elevados) cujas semelhanças não se devem à origem comum.

A razão pela qual Darwin inclui o grau de semelhança entre os critérios a serem usados para a classificação é que a ramificação e a divergência não são correlacionadas de forma absoluta. Há padrões de ramificação ("árvores") nos quais todos os ramos divergem mais ou menos às mesmas taxas. Embora isso não seja exatamente verdadeiro para as famílias linguísticas, elas tendem nessa direção. A razão é que os fatores responsáveis pela evolução das línguas não são adaptativos, e sim estocásticos. Quando os anglo-saxões cruzaram o mar do Norte e colonizaram a Inglaterra, sua língua não precisou se adaptar ao clima britânico ou às mudanças políticas. Porém, quando um ramo dos répteis (os dinossauros) conquistou

o nicho aéreo, ele teve de se tornar adaptado a uma nova forma de viver, e isso resultou em uma modificação drástica em seu fenótipo.* Ramos relacionados de dinossauros que permaneceram no nicho ancestral não mudaram praticamente nada. Essa consideração de fatores ecológicos e de seu impacto no fenótipo caracteriza uma classificação darwinista.

Até 1965, a classificação darwinista era o sistema usado quase universalmente, e ele continua popular hoje.¹² A delimitação e o agrupamento de espécies aparentadas por meio da similaridade é o primeiro passo nesse processo, e o teste da monofilia desses grupos e de sua disposição na árvore genealógica é o segundo. Esta é a única maneira pela qual ambos os critérios de Darwin para uma classificação sólida dos organismos podem ser satisfeitos.¹³

A dificuldade encontrada pelos taxonomistas é a evolução discordante de diferentes conjuntos de caracteres. Classificações inteiramente diferentes, por exemplo, podem resultar do uso de caracteres que se manifestam em diferentes estágios do ciclo de vida, como caracteres larvais *versus* adultos. No estudo de um grupo de abelhas, Michener (1977) obteve quatro classificações diferentes quando agrupou essas espécies em classes de semelhança de acordo com características de: (1) larvas, (2) pupas, (3) morfologia externa dos adultos, (4) genitálias masculinas. Quase invariavelmente, quando um taxonomista faz uso de um conjunto novo de caracteres, isso leva a uma nova delimitação dos táxons ou a uma mudança de nível. Mesmo as características de um estágio único do ciclo de vida podem mudar entre os táxons a taxas muito desiguais durante a evolução.

* Mayr usa aqui uma "licença poética" para se referir aos pterossauros (répteis alados do tempo dos dinossauros) que os paleontólogos consideram incorreta. Pterossauros não são dinossauros modificados, mas répteis que pertencem ao mesmo grupo que dinossauros e crocodilos (o dos arcossaumorfos) e que evoluíram independentemente. Dinossauros são formas exclusivamente terrestres. (N. T.)

Por exemplo, quando se comparam os humanos com seus parentes mais próximos, os chimpanzés, descobre-se que o *Homo* é mais parecido com o *Pan* em algumas características moleculares do que algumas espécies do mesmo gênero de *Drosophila* se parecem umas com as outras. Ainda assim, como todos sabemos, os humanos diferem dos macacos antropóides, mesmo deste parente mais próximo, de forma muito drástica em alguns caracteres tradicionais (o sistema nervoso central e suas capacidades) e na ocupação de uma zona adaptativa bastante distinta. Quase todos os sistemas de órgãos e grupos de moléculas em uma linhagem filética terão uma taxa de mudança algo diferente da de todas as outras linhagens. Essas taxas não são constantes; elas podem acelerar ou desacelerar ao longo da evolução. Algumas mudanças no DNA são cinco vezes mais rápidas num grupo de roedores do que nos primatas, por exemplo. As diferentes taxas de evolução dos diversos componentes do fenótipo requerem uma grande cautela quando se vai escolher os caracteres nos quais uma classificação será baseada. O uso de diferentes conjuntos de caracteres pode levar a classificações bem diferentes.

Cada nível da hierarquia lineana tradicional (como espécie, gênero, ordem e assim por diante) é chamado de categoria.¹⁴ Quanto mais baixo é o nível de determinado táxon (grupo) de organismos, mais semelhantes entre si são as espécies neles incluídas e mais recente é o seu ancestral comum. Não há definições operacionalmente definidas para nenhuma das categorias mais altas. Muitos táxons mais elevados são extremamente bem delimitados e podem ser descritos sem ambigüidade e com alta acuidade (por exemplo, aves ou pingüins), mas a categoria na qual eles são colocados geralmente é subjetiva e envolve um elemento de julgamento. Um dado grupo de gêneros pode ser chamado de tribo por alguns autores, enquanto outros o chamariam de família ou subfamília.

A maior parte das classificações atuais foi desenvolvida durante o auge da anatomia comparada, no período imediatamente posterior a Darwin. Naquela época, sempre que se procurava um ancestral comum, este era concebido não como uma única espécie ancestral, mas como um táxon. Portanto, o ancestral comum mais próximo de uma mesma categoria de mamíferos, ou de um nível inferior, são os répteis terápsidos, e o das aves são os dinossauros (ou algum outro grupo de répteis). Devido a esse conceito e a essa definição de monofilia, todos os táxons na taxonomia tradicional (quando corretamente formados) eram monofiléticos. Da mesma forma, de acordo com esse conceito de monofilia, nenhum grupo é parafilético. Para um cladista, um grupo é parafilético se contém o clado-raiz (ramo) de um táxon derivado. O conceito de parafilia não faz sentido em uma classificação darwinista. Para Darwin, então, um táxon era monofilético se todos os seus membros descendessem de um ancestral comum mais próximo, pertencente ao mesmo nível categórico, e essa definição é mantida ainda hoje pelos taxonomistas darwinistas.

Uma hierarquia lineana típica é caracterizada por uma boa dose de descontinuidade. Entre os organismos existentes hoje, não há um intermediário entre répteis e mamíferos, nem entre tubinarnes [grupo dos albatrozes] e pingüins, nem entre turbelários e trematódeos. Essa observação intrigou muita gente durante bastante tempo e inspirou diversas teorias saltacionais não-darwinistas. As pesquisas evolucionistas, no entanto, ajudaram a entender esse padrão de diversidade.

A maior parte dos novos tipos de organismo não se origina da transformação gradual de uma linhagem filética, ou seja, de um tipo preexistente. Em vez disso, uma espécie fundadora entra em uma nova zona adaptativa e triunfa em seu ambiente ao fazer ajustes rápidos para uma adaptação ótima. Uma vez tendo obtido isso, uma nova linhagem pode entrar em um período de estase, durante

o qual pode haver uma boa dose de especiação, mas nenhuma reconstrução do tipo estrutural (bauplan). As mais de 2 mil espécies de *Drosophila* ilustram essa situação. As mais de 5 mil espécies de pássaros canoros também são variações sobre um único tema.

Os dois processos evolutivos que produzem espécies — a mudança fenotípica ao longo do tempo e o aumento na diversidade (especiação) — são apenas frouxamente correlacionados. Na hierarquia lineana tradicional, os hiatos entre os táxons e a grande variação no tamanho de táxons relacionados são explicados por essa falta de correlação. Quando uma espécie fundadora alcança uma zona adaptativa altamente adequada, ela pode passar por uma especiação copiosa sem experimentar nenhuma pressão seletiva por uma mudança no tipo estrutural básico.¹⁵ O sistema de classificação darwinista é particularmente apropriado para lidar com táxons de tamanho muito desigual e para refletir os hiatos entre os táxons ancestrais e derivados.

Mas os problemas para o classificador darwinista aparecem quando a classificação “horizontal” dos organismos é expandida de modo a incluir a biota extinta. A biota recente consiste nas pontas dos incontáveis ramos da árvore evolutiva. Táxons mais elevados são separados um do outro por hiatos causados por evolução divergente e extinção. No entanto, uma classificação completa dos organismos deve incluir grupos extintos, todos eles aparentados um com o outro e com a biota viva. A classificação dos táxons fósseis levanta vários problemas sobre os quais ainda não existe consenso. Como deveríamos tratar os táxons fósseis que são intermediários entre dois táxons vivos? Novos táxons, quase invariavelmente, surgem por “brotamento”, com o táxon ancestral continuando a prosperar. O registro fóssil é geralmente incompleto demais para poder dar evidências da “espécie-tronco” de determinado táxon.

A abordagem da classificação darwinista de dois critérios — genealogia e semelhança — permaneceu virtualmente sem ataques

de 1859 até meados do século xx. Muitos taxonomistas, é claro, não praticaram a adesão conscienciosa ao teste de monofilia e à avaliação cuidadosa da similaridade. Métodos inteiramente novos, no entanto, só foram propostos a partir da década de 1960. Cada uma dessas novas metodologias usa apenas um dos dois critérios de Darwin: a fenética numérica se baseia na similaridade, enquanto a cladificação (ordenamento de Hennig) se baseia na genealogia.

Fenética numérica

O objetivo dos feneticistas numéricos é evitar toda e qualquer subjetividade e arbitrariedade ao agrupar as espécies, usando métodos numéricos, em grupos que concordam em uma grande quantidade de características conjuntas. Os feneticistas acreditam que os descendentes de um ancestral comum compartilharão uma multiplicidade tão grande de caracteres que formarão automaticamente táxons bem definidos.

Algumas objeções importantes à fenética numérica são que ela é um método trabalhoso, que requer a análise de um número muito grande de caracteres (mais de cinquenta, de preferência mais de cem); que não dá pesos diferentes a caracteres de importância taxonômica diversa; que não acomoda taxas evolutivas diferentes em diferentes complexos de caracteres; que seus métodos produzem classificações diferentes quando conjuntos diferentes de caracteres são usados; e que não pode ser aprimorada gradualmente.

Enquanto apenas caracteres morfológicos estiveram disponíveis, a fenética numérica permaneceu insatisfatória, simplesmente porque não havia caracteres em número suficiente para contar. Quando grandes quantidades de caracteres moleculares se tornaram disponíveis, a situação mudou consideravelmente. A hibridação de DNA é na verdade um método fenético, mas ela evita a maioria das limitações da análise fenética, graças ao número

enorme de caracteres que são levados em conta. Alguns dos métodos de “distância” da análise taxonômica computacional são também essencialmente fenéticos. Ainda há uma discordância considerável quanto ao valor desses métodos, se comparados a outras abordagens (como a parcimônia).

Cladificação

A outra alternativa recente à classificação darwinista é um sistema de ordenamento que se baseia somente na genealogia. Em 1950, Willi Hennig publicou em alemão um método que, ele alegava, permitiria o estabelecimento de uma classificação genealógica livre de ambigüidades. Seus critérios mais básicos eram os seguintes: apenas grupos baseados exclusivamente na posse de inquestionáveis “apomorfias”, isto é, caracteres derivados compartilhados, deveriam ser reconhecidos, ao passo que caracteres ancestrais (“plesiomorfias”) deveriam ser ignorados. Além disso, cada táxon deveria consistir em um ramo da árvore filogenética que contivesse a espécie-tronco desse ramo e todos os seus descendentes, incluindo todos os “ex-grupos”, ou seja, descendentes drasticamente modificados, como as aves e os mamíferos dos répteis. O sistema de referência de Hennig, portanto, consiste simplesmente em ramos (“clados”) da árvore filogenética, sem que se dê importância alguma à similaridade (isto é, à quantidade de mudanças evolutivas).

Na avaliação darwinista da similaridade são usados tantos caracteres quanto for possível, não só apomorfias. Portanto, os caracteres ancestrais (plesiomórficos) são considerados apropriadamente porque eles com frequência contribuem fortemente para o aspecto de um táxon — e, portanto, para seu status classificatório. O mesmo vale para a consideração das autapomorfias no ordenamento dos táxons-irmãos. O uso do maior

número possível de caracteres dá um valor adicional a uma classificação darwinista: "Atribuir um objeto a determinada classificação [deveria] nos informar o máximo possível acerca desse objeto. Para uma percepção extrema de ordem, o ideal seria que a classificação correta pudesse potencialmente nos dizer tudo sobre um objeto" (Dupré 1993: 18).

A classificação darwinista compartilha com a cladística, em contraste com a fenética numérica, a convicção de que a causa do agrupamento precisa ser considerada. Conseqüentemente, essas duas escolas de macrotaxonomia insistem em que os táxons por elas reconhecidos precisam ser monofiléticos. De acordo com a definição tradicional, um táxon é monofilético se todos os seus membros descenderem de um táxon ancestral comum mais próximo, e esta é a definição ainda mantida pelos taxonomistas darwinistas. Hennig, no entanto, propôs um princípio inteiramente diferente. Para ele, um grupo é "monofilético" quando se compõe de todos os descendentes da espécie-tronco. Uma vez que essa definição leva a uma delimitação inteiramente diferente dos táxons, Ashlock (1971) propôs o termo "holofilético" para o novo conceito de Hennig. O termo tradicional "monofilético" é um adjetivo que qualifica um táxon, enquanto o conceito de holofilia de Hennig se refere a um método de delimitar táxons. Mesmo que os táxons delimitados pelo método tradicional possam diferir dos cládons delimitados pelo método de Hennig, ambas as hierarquias dos táxons são estritamente genealógicas.

Um clado do sistema de Hennig não corresponde a um táxon na classificação darwinista e não deveria, portanto, receber o nome técnico de "cládon".¹⁶ Cada cládon remonta à (e portanto inclui a) "espécie-tronco", ou seja, a espécie que exibe o primeiro caractere apomórfico desse ramo (clado). Uma vez que os clados, e não as classes, formam a base do sistema de Hennig, este pode ser diferenciado de classificações genuínas pelo termo "cladificação".

A metodologia de dividir os caracteres entre ancestrais é unicamente derivados, a chamada análise cladística, é um método excelente de análise filogenética. É uma forma adequada de testar a monofilia de um táxon. Qualquer pessoa interessada nos aspectos filogenéticos dos caracteres achará a cladificação um método excelente para ordenar as espécies e os táxons de acordo com a sua filogenia. No entanto, por mais valioso que um cladograma seja para os estudos filogenéticos, ele viola quase todos os princípios da classificação tradicional. Entre as suas deficiências estão as seguintes:

(1) A maioria dos clados (cládons) é altamente heterogênea, sendo a espécie-tronco e outros grupos-tronco muito mais semelhantes aos grupos-tronco dos clados-irmãos do que aos grupos apicais do próprio clado. Em outras palavras, grupos dissimilares de espécies são agrupados em um cládon, e grupos similares de espécies (grupos-tronco irmãos) acabam sendo separados em cládons diferentes.

(2) Muito freqüentemente, ou a espécie-tronco ou todo o grupo-tronco foram incluídos em um táxon ancestral, como os répteis terápsidos, ancestrais dos mamíferos, entre os Reptilia, e os dinossauros, supostos ancestrais das aves, também entre os Reptilia. Retirar esses grupos-tronco do táxon no qual eles estiveram até agora torna esse táxon "parafilético" e, portanto, de acordo com os princípios da cladística, inválido enquanto táxon. O resultado é a destruição de boa parte dos táxons superiores atualmente reconhecidos, e isso inclui todos os táxons fósseis reconhecidos que deram origem a táxons derivados.

(3) A obrigatoriedade de alocar todos os grupos irmãos no mesmo nível taxonômico não é realista, porque os grupos irmãos com freqüência, se não geralmente, diferem no número de caracteres autapomórficos, ou seja, caracteres derivados restritos a este ou àquele ramo particular. Um grupo irmão que evoluiu muito pouco desde a sua origem e um que sofreu uma transformação

evolutiva dramática (por exemplo, as aves) deveriam ser colocados na mesma categoria de acordo com o arranjo original de Hennig.

(4) Não há uma teoria válida que baseie o estabelecimento de níveis categóricos na metodologia de Hennig. Seus próprios seguidores abandonaram os únicos dois critérios de nivelamento de Hennig, o tempo geológico e a igualdade de categoria dos grupos irmãos. Em vez disso, eles adotaram o único critério que Hennig rejeitou especificamente, o grau de diferença, mas têm apenas critérios subjetivos para sua avaliação.

(5) De acordo com Hennig, cada nova sinapomorfia (caractere derivado) de uma espécie-tronco requer a constituição de um novo nível categórico. Embora ignorados pela maioria dos cladistas, alguns aplicaram esse princípio ao nível de espécie e chegaram mesmo a exigir que toda população seja elevada ao nível de espécie se diferir até em um único caractere (o conceito filogenético de espécie). Tal pulverização do sistema, logicamente, levaria ao caos taxonômico, tornando virtualmente impossível recuperar qualquer informação.

(6) Todos os caracteres não-apomórficos são ignorados. Uma das regras mais antigas e mais corroboradas da taxonomia é que, quanto mais caracteres forem usados em uma classificação, mais útil e confiável, no geral, essa classificação será. Mesmo que apenas caracteres derivados sejam utilizados em uma análise cladística, tal restrição não faz sentido algum quando se trata de delimitar os táxons em uma classificação. Com efeito, muitos táxons são caracterizados pela prevalência de caracteres ancestrais. Além do que isso mascara completamente taxas evolutivas assimétricas se os caracteres autapomórficos forem ignorados. Tornou-se evidente que uma classificação hennigiana, na verdade, tem mais as características de um esquema de identificação do que de uma classificação tradicional. Com efeito, cladistas eminentes ressaltaram diversas vezes que a sua metodologia é uma busca de caracteres com valor diagnóstico.

(7) Os cládons delimitados pelos cladistas refletem um relacionamento unilateral, porque seus grupos irmãos, mesmo sendo mais aparentados geneticamente que os descendentes distantes, são excluídos dos cládons. De acordo com os princípios da cladística, os descendentes modernos de Carlos Magno são mais aparentados com ele do que ele era com seus irmãos e irmãs.

A princípio, uma classificação cladística é uma classificação de um caractere único. O clado, ou cládon, é caracterizado pela primeira apomorfia da espécie-tronco.¹⁷ Qualquer classificação de um caractere único, mesmo que concorde estritamente com as regras filogenéticas, resulta em táxons artificiais e heterogêneos. Uma boa classificação, dizem, é baseada no maior número possível de caracteres.

Essas deficiências da cladificação filogenética de Hennig mostram por que ela não pode tomar o lugar de uma classificação darwinista tradicional. No entanto, se estamos interessados apenas na informação filogenética, então devemos usar o sistema de Hennig. Em outras palavras, tanto a cladificação de Hennig quanto a classificação darwinista são legítimas, mas elas têm aplicações e objetivos muito diferentes.¹⁸

ARMAZENANDO E RECUPERANDO INFORMAÇÃO

Tendo em vista todas essas dificuldades, é de esperar que autores diferentes defendam classificações diferentes. Qual delas devemos escolher? A resposta é: devemos escolher a que for mais prática e a que seja mais adequada à manutenção da estabilidade do armazenamento e da recuperação de informações. A estabilidade é um dos pré-requisitos de qualquer sistema de comunicação; a utilidade de uma classificação está ligada diretamente à sua estabilidade. O sistema darwinista tradicional de classificação

tende a ser muito estável e é, portanto, ideal sob esse ponto de vista. As cladificações, por outro lado, frequentemente conflitam com as classificações tradicionais, e o estudo de novos caracteres, bem como uma resolução das homoplasias, pode resultar em cladificações bastante modificadas e, portanto, em instabilidade.

A seqüência dos táxons em uma coleção ou em uma classificação escrita precisa ser obrigatoriamente linear (unidimensional), mas a origem comum é um fenômeno de ramificação que acontece em três dimensões. A maneira como se corta uma árvore filogenética em seus ramos e galhos e como se arranjam esses ramos e galhos em uma seqüência é algo um tanto arbitrário. Isso é especialmente verdadeiro quando a árvore filogenética é um arbusto (tamnograma) em vez de uma árvore (dendrograma). Várias convenções já foram adotadas para resolver esse problema: (1) Ponha os táxons que são obviamente derivados depois daqueles dos quais eles derivaram, como os trematódeos e os cestóides depois dos tubelários. (2) Liste os táxons especializados depois daqueles mais generalizados, aparentemente mais “primitivos”. (3) Evite mudar qualquer seqüência amplamente adotada sem uma boa razão, porque tais seqüências tradicionais são importantes para o armazenamento e a recuperação de informações, uma vez que foram adotadas em coleções e na literatura taxonômica.¹⁹

Nomes

Os nomes dos táxons mais elevados servem como selos convenientes ao propósito da recuperação de informações, e termos como Coleoptera e Papilionidae devem significar a mesma coisa para zoólogos do mundo inteiro, de modo a terem utilidade máxima.²⁰ Seria impossível se referir aos milhões de organismos existentes e armazenar informações a respeito deles se não houvesse um sistema eficiente e universalmente adotado de nomen-

clatura. Por essas razões práticas, os taxonomistas adotam uma série de regras que lidam com o batismo das criaturas.

Essas regras são escritas em códigos internacionais de nomenclatura zoológica, botânica e microbiológica. Os objetivos principais do sistema de comunicação dos taxonomistas estão bem enunciados no preâmbulo do *Código de nomenclatura zoológica* (1985): “O objetivo do código é promover a estabilidade e a universalidade dos nomes científicos dos animais, e assegurar que cada nome seja único e distinto. Todas as suas provisões devem servir a esses fins”. O nome científico de uma planta ou de um animal é composto de um epíteto de gênero e um de espécie (a nomenclatura binomial de Lineu). Por exemplo, a pilosela-laranja é *Hieracium* (gênero) *aurantiacum* (espécie). A língua escolhida para os nomes científicos dos organismos é o latim, uma *lingua franca* entre os cientistas no período após a Idade Média.

A descrição original de uma nova espécie é muitas vezes insuficiente, em especial no caso de grupos pouco conhecidos, e pode não dar certeza sobre qual era a espécie que o autor da descrição tinha diante dele. Por essa razão, toda espécie tem um “tipo” único, que sempre pode ser examinado para determinar a que espécie ele pertence, com o uso de todas as informações adicionais adquiridas desde a descrição original. O uso da palavra “tipo” para se referir a esse exemplar, baseada na filosofia essencialista do período lineano, é enganoso, porque tal “tipo” não é particularmente típico para a espécie, e a descrição moderna de uma espécie não se baseia somente no tipo. Com efeito, uma vez que toda espécie e toda população é variável, a descrição da espécie precisa incluir uma avaliação cuidadosa dessa variabilidade; em outras palavras, ela precisa ser baseada em uma série de espécimens.

O tipo de uma espécie é o espécime; o tipo de um gênero é a espécie (a espécie-tipo); e o tipo de uma família é o gênero. O nome de uma família deve ser formado a partir do tronco do nome do

gênero-tipo. A localidade onde o espécime-tipo foi coletado é a localidade-tipo. Essa informação é importante para todas as espécies politípicas, ou seja, as espécies que consistem em várias subespécies geográficas.

Se vários nomes estiverem disponíveis para um táxon, o mais antigo é em geral o nome válido. No entanto, já aconteceu, especialmente nas primeiras fases da taxonomia, de um nome mais velho ter sido ignorado ou rejeitado por diversas razões, e um nome júnior ter se tornado o nome universalmente aceito para aquele táxon. A recuperação de informações é gravemente prejudicada quando, em um período muito posterior, o nome previamente ignorado é restabelecido simplesmente por uma questão de prioridade. Há regras nos códigos modernos que estabelecem as condições sob as quais um nome prévio pode ser suprimido de forma a manter a estabilidade da nomenclatura. O princípio da prioridade é aplicado à nomenclatura zoológica apenas no caso de espécies, gêneros e famílias, nunca aos nomes dos táxons mais elevados.²¹

O SISTEMA DOS ORGANISMOS

Até meados do século XIX, mais ou menos, os organismos eram classificados em animais e plantas. Qualquer coisa que não fosse claramente um animal era colocada entre as plantas. No entanto, o estudo mais detalhado dos fungos e dos microrganismos deixou muito claro que estes não tinham nada a ver especificamente com as plantas, e sim que deveriam ser reconhecidos como táxons mais elevados independentes. A revisão mais drástica da classificação dos organismos resultou do vislumbre da década de 1930 de que os Monera (procariontes), que consistiam em bactérias e seus parentes, eram algo inteiramente distinto de todos os outros organismos (eucariontes), que possuem células nucleadas.

Desde a origem da vida (há cerca de 3,8 bilhões de anos) até cerca de 1,8 bilhão de anos atrás, só havia procariontes na Terra. Eles hoje são geralmente divididos em dois reinos, o Archaeobacteria e o Eubacteria,* que diferem principalmente nas suas adaptações e na estrutura de seus ribossomos.²² Há cerca de 1,8 bilhão de anos, os primeiros eucariontes unicelulares se originaram, caracterizados por um núcleo envolto por uma membrana e com cromossomos discretos, e pela posse de várias organelas celulares. Estas evidentemente evoluíram através da incorporação de procariontes simbióticos. Os exatos detalhes da origem dessa simbiose, e especialmente de que forma o núcleo passou a existir, ainda são controversos. Os primeiros registros fósseis dos organismos multicelulares aparecem há cerca de 670 milhões de anos.

Há diversas maneiras possíveis de classificar os eucariontes. Até recentemente, por uma questão de conveniência, os eucariontes unicelulares eram em geral combinados em um único táxon, os protistas (Protista). Embora fosse de compreensão geral que alguns protistas (Protozoa) eram mais parecidos com os animais, que outros eram mais próximos das plantas e que outros, ainda, se aproximavam mais dos fungos, o critério diagnóstico tradicional de plantas e animais (presença de clorofila, mobilidade) geralmente não se aplicava nesse nível, e havia apenas incerteza demais sobre as relações de parentesco para que o conveniente selo "protistas" fosse mantido. Novas pesquisas, em especial as de Cavalier-Smith, que fazem uso de caracteres previamente desprezados (por exemplo, a presença de certas membranas) e de características moleculares, esclareceram consideravelmente as coisas.

* A maioria dos microbiólogos hoje reconhece que as Archaeobacteria (arqueias) são diferentes das eubactérias o suficiente para serem colocadas em um domínio (categoria superior ao reino) à parte, o *archaea*. Os outros domínios da vida são o *bacteria* (bactérias) e o *eukarya* (todos os eucariontes). Em nota no final deste livro, Mayr ataca essa divisão. (N. T.)

Embora ainda possa ser conveniente chamar os eucariontes unicelulares de protistas, um táxon formal Protista não é mais defensável. Reconhecer três, cinco ou sete reinos para esses protistas ainda é objeto de discussão entre aglutinadores [*lumpers*] e separadores [*splitters*]*. ²³ Para o leigo, é provavelmente conveniente reconhecer um número menor. Assim, o sistema dos organismos pode ser dividido em dois impérios e em seus respectivos reinos:

Império Prokaryota (Monera)

Reino Eubacteria

Reino Archaeobacteria

Império Eukaryota

Reino Archezoa

Reino Protozoa

Reino Chromista

Reino Metaphyta (plantas)

Reino Fungi

Reino Metazoa (animais)

* Os taxonomistas são, eles mesmos, “classificados” em *lumpers* e *splitters*, conforme sua propensão a achar que determinados graus de variação entre os organismos ainda justificam sua inclusão em um mesmo táxon ou a criação de um novo táxon, respectivamente. (N. T.)

8. Perguntas do tipo “Como?”: a construção de um novo indivíduo

Toda espécie consiste em milhares, milhões ou mesmo bilhões de indivíduos. Muitos deles morrem todos os dias e são substituídos por novos indivíduos. Embora geralmente pensemos na reprodução sexuada como o mecanismo para gerá-los, a forma mais simples de obter um novo indivíduo é dividir um organismo preexistente em dois. Essa é a forma normal de reprodução dos procariontes, de muitos protistas e fungos, e mesmo de alguns filos de invertebrados.

Além da divisão, há várias outras maneiras de se reproduzir sem sexo. Uma estratégia freqüente entre algumas plantas e invertebrados é produzir um novo indivíduo por brotamento. Em algum lugar do corpo surge um broto, que acaba se partindo e tornando-se um novo indivíduo. A reprodução vegetativa, especialmente por meio de estolhos subterrâneos, também é freqüente em plantas. Em alguns organismos assexuados, novos indivíduos se desenvolvem somente a partir dos ovos — não é necessária a fertilização. Afídeos, crustáceos planctônicos e outros animais podem alternar entre gerações sexuadas e gerações partenogenéticas.

No caso dos organismos superiores, a maioria dos novos indivíduos nasce exclusivamente por meio da reprodução sexuada, que envolve muitos eventos complexos para a produção de óvulos e espermatozóides, para o acasalamento e o cuidado com o embrião em desenvolvimento. Não surpreende, portanto, que essa seja a fonte de uma das mais longas controvérsias da biologia evolutiva: explicar a vantagem seletiva dessa estratégia de reprodução.

Uma fêmea que produza filhotes por partenogênese tem aparentemente o dobro da fertilidade de uma fêmea que desperdiça, por assim dizer, metade da sua progênie na forma de machos, que não são capazes de se reproduzir sozinhos. A explicação para o sucesso da reprodução sexuada é que ela aumenta em muito a variabilidade genética da prole, e uma variabilidade maior traz múltiplas vantagens na luta pela sobrevivência — a redução da vulnerabilidade a doenças é uma delas.

Nenhum outro fenômeno no mundo vivo, à exceção do mecanismo de funcionamento do cérebro, é tão miraculoso nem inspira tanto assombro quanto o desenvolvimento de um óvulo fertilizado em um adulto. A história da nossa compreensão desse processo pode ser dividida, *grosso modo*, em três períodos. O primeiro, que vai da Antiguidade até por volta de 1830, focalizou a descrição do embrião em desenvolvimento. Os estudiosos durante esse período se preocuparam particularmente com as contribuições dadas pelo pai e pela mãe ao embrião. Um segundo período começou com a teoria celular, quando se descobriu que o óvulo dos vertebrados era uma única célula e que o elemento do sêmen responsável pela fertilização, o espermatozóide, também era uma única célula. Durante esse período, os pesquisadores estavam particularmente interessados na divisão do óvulo fertilizado e no destino de cada uma das células resultantes dessa divisão, ou seja, sua contribuição para as diferentes estruturas e os diferentes órgãos. A embriologia teve obrigatoriamente de ser muito descritiva

durante esses dois primeiros períodos. O objetivo era descobrir *o que acontece*.

Durante o terceiro período tornou-se possível investigar *como* o desenvolvimento ocorre — ou seja, quais são os mecanismos que resultam na formação das estruturas embrionárias. A partir do começo do século xx, foi demonstrado que o desenvolvimento é controlado por genes específicos, e também que interações complexas acontecem entre as partes do embrião. Assim, o comportamento das células em desenvolvimento era atribuível não só aos genes, mas também ao ambiente celular no qual elas se encontravam em cada estágio do desenvolvimento.

Novamente por necessidade, a análise dos genes e dos processos bioquímicos por eles controlados teve de ser reducionista no começo, mas logo se percebeu que os genes interagem um com o outro e com o ambiente celular, como músicos em uma orquestra. O estudo dessa bem orquestrada interação entre genes e células durante o desenvolvimento de um indivíduo é hoje a fronteira da biologia do desenvolvimento. Mas esses estudos só puderam ter início depois de séculos de um minucioso trabalho descritivo. As descobertas foram dolorosamente lentas.

A ALVORADA DA BIOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO

A diversidade é a característica mais marcante do mundo vivo, e isso também vale para os processos do desenvolvimento. Ainda assim, organismos aparentados entre si geralmente têm padrões de desenvolvimento semelhantes. Que o desenvolvimento de um pintinho em um ovo incubado é um processo análogo ao do de um embrião de mamífero — também um vertebrado — era algo que os egípcios já haviam vagamente percebido, talvez por volta de 1000 a. C. Mas o pouco que se sabia foi completamente

ofuscado pelos grandes escritos de Aristóteles sobre a embriologia descritiva e comparada em animais. Ele estabeleceu o campo da biologia reprodutiva, ao discutir a natureza da masculinidade e a da feminilidade, a estrutura e a função dos órgãos reprodutivos, a viviparidade (caracterizada por nascimentos vivos) *versus* a oviparidade (caracterizada por ovos que são chocados fora do corpo), a forma da copulação em diferentes tipos de animal, a origem e as características do sêmen e quase todos os outros aspectos concebíveis da reprodução e do desenvolvimento.

Com efeito, Aristóteles enfrentou, já naquela época, dois grandes problemas da área da reprodução que permaneceram controversos até o final do século XIX. Um deles era a teoria da pangênese (segundo a qual todas as células do corpo fornecem material hereditário para as células germinativas). O outro era o debate sobre pré-formação *versus* epigênese. É quase inconcebível a maneira como esse pioneiro no campo do desenvolvimento animal pôde escrever um relato tão completo, baseado em observações comparativas tão amplas e governado por um julgamento tão excelente que precisou esperar até o século XIX para ser superado.

No entanto, Aristóteles também era humano — e cometeu alguns erros. Embora as fêmeas em todos os outros grupos de animais observados por ele produzissem ovos, aparentemente nunca lhe ocorreu que as fêmeas de mamífero também pudessem ter ovos. Em vez disso, ele adotou uma teoria segundo a qual o sêmen do macho dava forma ao coágulo do sangue menstrual da fêmea, originando assim o embrião dos mamíferos.¹

Durante muito tempo se acreditou que Aristóteles tivesse cometido um segundo erro quando ele tentou explicar a especificidade do desenvolvimento, que tanto o impressionava. O ovo de uma rã invariavelmente se transformava em uma rã, e não em um peixe ou em um frango, como se contivesse alguma informação que o guiasse na direção de seu objetivo final. Essa especificidade induziu

Aristóteles a postular uma “causa final” responsável pelo inequívoco desenvolvimento do ovo até o estágio adulto. Somente em nossa época as pessoas se deram conta de que o *eidos*, o agente aparentemente metafísico de Aristóteles, era nada menos do que aquilo que hoje chamamos de programa genético, portanto algo perfeitamente explicável por processos físico-químicos. O desenvolvimento de um óvulo fertilizado é guiado por um programa genético.²

Embora a reprodução e o desenvolvimento dos embriões fossem certamente objeto de fascínio através dos séculos, a disciplina da biologia do desenvolvimento não fez de fato progresso nenhum depois de Aristóteles até que Harvey, no século XVII, estudasse cuidadosamente embriões incubados de galinha a olho nu, com o auxílio de uma lente simples. Ele claramente descreveu uma estrutura na membrana da gema do ovo como sendo o ponto a partir do qual o embrião se originava. Harvey também demonstrou que não havia nenhum sangue menstrual coagulado no útero que servisse de contribuição da fêmea ao embrião, e postulou a existência de um ovo em mamíferos. Logo depois, os folículos ovarianos foram descritos por Stensen e De Graaf, embora o verdadeiro óvulo dos mamíferos só tenha sido descoberto em 1827 por Karl Ernst von Baer. Ficou claro que o ovário era o equivalente feminino dos testículos.

Muitos detalhes sobre o desenvolvimento dos pintinhos foram acrescentados nos anos que se seguiram ao trabalho de Harvey, em especial através do uso dos microscópios compostos primitivos. Primeiro foi Malpighi, depois Spallanzani, Von Haller e Caspar Friedrich Wolff que expandiram nosso conhecimento sobre os detalhes do desenvolvimento do pintinho. Todos esses pesquisadores, no entanto, ainda tentavam correlacionar o desenvolvimento gradual dos órgãos embrionários com as teorias fisiológicas de Aristóteles. Estas eram o arcabouço conceitual no qual eles tentaram encaixar suas observações.

Por outro lado, no século XIX a embriologia foi conduzida com um espírito inteiramente diferente — um espírito mais verdadeiramente científico, seria quase possível dizer. Em todas as áreas da biologia funcional, o estabelecimento de fatos concretos se tornou a base indispensável de uma teoria sólida. Os três grandes representantes da embriologia no começo do século XIX, Christian Pander, Heinrich Rathke e Von Baer, primeiro descreveram cuidadosamente suas descobertas, baseadas sobretudo nos embriões de galinha, e só então passaram a teorizar sobre elas.³ Isso incluiu o reconhecimento da notocorda, do tubo neural e, o mais importante de tudo, das três camadas germinativas. Esses embriologistas compararam seus achados no pintinho com estudos feitos com outros vertebrados, e eventualmente até com os lagostins e outros invertebrados.

O desenvolvimento do pintinho e o desenvolvimento, bastante semelhante a este, da rã, ambos prontamente ao alcance dos pesquisadores, têm sido tradicionalmente considerados o padrão-ouro da embriologia. Porém, ambos são característicos apenas dos vertebrados, ao passo que existe um número sem fim de vias separadas de desenvolvimento em outros filos de organismos.⁴ O padrão de clivagem do ovo em desenvolvimento, em especial, pode diferir sensivelmente em grupos distintos de organismos. Quando os embriologistas experimentais do século XIX compararam o desenvolvimento dos vertebrados com o dos tunicados, dos equinodermos, dos moluscos e de outros filos de invertebrados, muitas diferenças saltaram aos olhos. A maioria das generalizações nas próximas páginas se aplica somente aos vertebrados.

O IMPACTO DA TEORIA CELULAR

Uma das várias contribuições unificadoras da teoria celular, proposta no final da década de 1830 por Schleiden e Schwann, foi

dar um sentido novo aos termos óvulo e sêmen, que até aquela época eram conceitos algo disformes. Remak (1852) foi a primeira pessoa a demonstrar que o ovo [óvulo] é uma célula. Mas mesmo depois de Leeuwenhoek ter descoberto espermatozóides no sêmen, em 1680, a crença geral era de que eles eram apenas parasitas do sêmen. Outros declararam que eles eram os portadores da contribuição do pai para o embrião, mas ninguém se deu conta de que cada espermatozóide é uma célula, uma célula germinativa masculina, até que Kölliker o demonstrasse (1841).

Curiosamente, uma incerteza considerável ainda pairava a respeito do significado da fertilização até por volta de 1880. Para os fisicalistas, a fertilização era simplesmente o impulso ou sinal que iniciava a clivagem da célula-ovo. Foi assim que Miescher, o descobridor do DNA, interpretou a fertilização, já em 1874. Finalmente, citologistas como O. Hertwig e Van Beneden mostraram que o espermatozóide trazia muito mais ao óvulo do que o mero comando para iniciar a primeira clivagem; ele também trazia o núcleo da célula germinativa (gameta) masculina.

Esse núcleo, com seu conjunto haplóide de cromossomos masculinos, entra no óvulo. Esses cromossomos se combinam com o conjunto haplóide de cromossomos femininos do óvulo para formar o núcleo diplóide do zigoto. A fertilização, assim, não apenas restaura a diploidia como também combina, na prole, os genes do pai e da mãe. Os hibridizadores de plantas, como Koelreuter, haviam descoberto isso muito antes.

Epigênese ou pré-formação?

Mas como essa aparente bolha de material “disforme” do zigoto poderia dar origem a um frango, uma rã ou um peixe? Esse enigma levou a uma controvérsia, no século XVII, que durou até o século XX. No final, duas hipóteses foram desenvolvidas, ambas

baseadas em bons argumentos: as hipóteses da pré-formação e da epigênese. Ambas, sabe-se hoje, estavam parcialmente certas e parcialmente erradas.

Os pré-formacionistas derivaram sua hipótese da observação de que um óvulo fertilizado inequivocamente dá origem a um adulto da espécie que produziu esse óvulo. A partir disso, eles concluíram que, no momento da fertilização, uma miniatura do futuro organismo já está presente no óvulo ou no espermatozoide, e que todo o desenvolvimento é meramente um desdobrar — que eles chamaram de “evolução” — dessa forma original. Essa teoria foi fortalecida pela alegação do primeiro pré-formacionista, Malpighi, de que, quando ele olhava para um ovo fertilizado de galinha, era capaz de ver os estágios mais primitivos do desenvolvimento, uma indicação de que a forma do futuro organismo já estava pré-formada no ovo.

A extensão lógica do conceito de pré-formação era a suposição de que não só os organismos eram pré-formados como também, em um organismo pré-formado, todos os seus descendentes tinham de estar presentes. Essa extensão da pré-formação foi chamada de teoria do *emboitement* [literalmente “enlatamento”, em francês]. A questão que apareceu em seguida dizia respeito à localização do indivíduo pré-formado: ele estaria no óvulo, como afirmavam os chamados ovistas, ou no espermatozoide, como propunham os seus oponentes, os animaculistas? Numerosas descrições e ilustrações na literatura daquela época durante esse período mostravam um homenzinho (homúnculo) empacotado no espermatozoide.

Os experimentos de Koelreuter (1760) de hibridização com plantas refutaram claramente ambas as teorias pré-formacionistas, ao mostrar que os híbridos eram igualmente determinados pelo pai e pela mãe. Não poderia ter havido um adulto pré-formado da espécie em uma célula germinativa de apenas um dos pais. Essa prova decisiva contra a pré-formação foi ignorada por

muito tempo, talvez pelo fato de os experimentos terem sido feitos com plantas. Mas o mesmo acontecia com os burros e outros animais híbridos. Igualmente ignoradas foram as descobertas sobre a regeneração, que mostraram que, quando partes significativas de certos organismos eram removidas, como nas hidras ou em alguns anfíbios e répteis, elas podiam se regenerar, naquilo que era um processo essencialmente epigenético.

Os epigenistas, que se opunham aos pré-formacionistas, pensavam que o desenvolvimento começava com uma massa inteiramente disforme que ganhava forma por meio da ação de alguma *força externa*, uma *vis essentialis*, como foi chamada por C. F. Wolff.⁵ Mas a epigênese não conseguia explicar por que os ovos de uma galinha produziam galinhas e os de uma rã produziam rãs, nem era capaz de explicar a diferenciação dos tecidos e das estruturas embrionárias durante a ontogenia. Além disso, a crença na epigênese significava que toda espécie precisava ter a sua própria *vis essentialis*, algo bastante diferente das forças universais descritas pelos físicos, como a gravidade. Nenhum dos epigenistas podia explicar o que era a *vis essentialis* nem por que ela era assim tão específica.

Não obstante, os epigenistas venceram a controvérsia, especialmente depois que técnicas aprimoradas de microscopia foram incapazes de detectar qualquer traço que fosse de um corpo pré-formado nos óvulos recém-fertilizados. Mas a solução final para esse enigma só viria no século xx. O primeiro passo foi dado pelo campo da genética, que fez a distinção entre o *genótipo* (a constituição genética de um indivíduo) e o *fenótipo* (a totalidade dos caracteres observáveis nesse indivíduo) e mostrou que, durante o desenvolvimento, o genótipo, por conter os genes para produzir um pintinho, por exemplo, era capaz de controlar a produção de um fenótipo de pintinho. Dessa maneira, ao fornecer informações para o desenvolvimento, o genótipo é o elemento pré-formado.

Mas, uma vez que ele dirige o desenvolvimento epigenético da massa aparentemente disforme do ovo, também faz o papel da *vis essentialis* da epigênese.

Finalmente, a biologia molecular removeu a última incógnita ao mostrar que o programa genético contido no DNA do zigoto era a tal *vis essentialis*. A introdução do conceito de programa genético pôs um ponto final na velha controvérsia. De certa forma a resposta era, assim, uma síntese da epigênese e da pré-formação. O processo do desenvolvimento, o fenótipo que se desdobra, é epigenético. No entanto, o desenvolvimento também é pré-formatista, porque o zigoto contém um programa genético hereditário que determina, em grande parte, o fenótipo.

O fato de que a última palavra em uma longa controvérsia combine elementos dos dois campos em oposição é típico na biologia. Os concorrentes são como os proverbiais cegos que apalpam partes de um elefante. Eles têm parte da verdade, mas fazem extrapolações errôneas a partir dessas verdades parciais. A resposta final é obtida quando se eliminam os erros e se combinam as porções válidas das teorias opostas.

A diferenciação das células em desenvolvimento

Um dos aspectos mais maravilhosos — e, durante muito tempo, totalmente inexplicáveis — do desenvolvimento é a diferenciação gradual entre as células que descendem da célula única do zigoto. Como uma célula nervosa se torna tão diferente das células do trato intestinal, por exemplo?

O problema da diferenciação celular se tornou ainda mais intrigante nos anos 1870 e 1880, quando as pessoas enfim se deram conta de que a determinação genética residia no núcleo das células e, mais especificamente, nos cromossomos. Se o núcleo de toda célula do corpo continha os mesmos determinantes genéticos,

como Weismann alegava, como as células poderiam se diferenciar tanto ao longo do desenvolvimento do organismo?

A solução mais simples era assumir que, durante a divisão celular mitótica, quando os cromossomos se dividiam, uma combinação algo diferente de cromossomos, com elementos genéticos diferentes, iria parar nas duas células-filhas; a diferenciação celular dependeria, assim, dos elementos genéticos específicos que a célula recebia. Essa teoria da divisão celular desigual era sem dúvida a visão majoritária entre os cientistas dos anos 1880 até pelo menos 1900. Mas, se isso fosse verdade, então o grau de complexidade que os citologistas observavam na mitose não faria sentido. Roux (1883) perguntou acertadamente por que o núcleo simplesmente não se dividia em seu plano equatorial, com ambos os meios-núcleos resultantes se tornando os núcleos das células-filhas. Qual é o sentido desse elaborado mecanismo que, durante a mitose, converte cada cromossomo em um único e longo fio de cromatina? Isso só faz sentido, apontou Roux, se o núcleo consistir em um material altamente heterogêneo, talvez partículas singularmente distintas. Nesse caso, uma distribuição igual dessas partículas para as duas células-filhas só seria possível se essas partículas fossem costuradas em um único fio, por assim dizer, e esse fio fosse então fatiado longitudinalmente. Isso garantiria uma distribuição completamente igualitária do conteúdo heterogêneo do núcleo entre as duas células-filhas.

Sabemos hoje que a teoria de Roux estava essencialmente correta, e que ela era uma dedução brilhante a partir de suas próprias observações sobre a mitose. Infelizmente, pareceu ter sido refutada por algumas observações feitas nos anos subseqüentes, e Roux acabou desistindo de sua teoria original válida e aceitou a divisão celular desigual. As razões para essa conversão foram estudos que mostraram que, depois das primeiras divisões, as células descendentes de alguns organismos eram demasiado diferentes e davam origem a sis-

temas de órgãos também muito diferentes. Como isso poderia acontecer se os elementos genéticos fossem divididos igualmente?

Outras descobertas aprofundaram o mistério. Experimentos feitos por Roux, Driesch, Morgan e Wilson mostraram que as primeiras células clivadas de diferentes grupos animais tinham “potências” distintas. As células clivadas de um ascídio, quando separadas, produziam uma linhagem de células descendentes que tinham as mesmas propriedades, como se não tivessem sido separadas; as duas células produzidas pela primeira clivagem produziam duas meias larvas de ascídio. Esse modo de diferenciação foi chamado de *desenvolvimento determinado* ou em *mosaico*. Mas quando as duas células resultantes da primeira clivagem de um ouriço-do-mar eram separadas, essas duas células acabavam por produzir duas larvas quase normais, embora de tamanho reduzido. Esse modo muito diferente de diferenciação viria a ser chamado de *desenvolvimento regulador*. Para complicar ainda mais as coisas, descobriu-se que o desenvolvimento em muitos grupos era algo intermediário entre esses dois modos.

Quanto mais os detalhes do desenvolvimento em diferentes organismos eram estudados, mais difícil se tornava estabelecer princípios gerais que fossem claros. Os processos em um tipo de organismo geralmente eram diferentes dos de outros. Algumas células em desenvolvimento pareciam imunes à influência de seu ambiente celular, enquanto outras pareciam ser completamente reprogramadas por ele. Algumas células permaneciam nos tecidos nas quais foram originalmente depositadas; outras se lançavam em migrações mais ou menos extensas pelo embrião. Mesmo depois de numerosos experimentos, a natureza da relação entre o genótipo, de um lado, e a diferenciação das células em clivagem, do outro, continuava a ser uma charada.⁶

Finalmente, em especial graças às contribuições da biologia molecular, no século xx, os estudiosos se deram conta de que todas

as células passam por um processo de diferenciação, e que em um momento qualquer do ciclo de vida apenas uma fração dos genes no núcleo de uma célula qualquer está ativa. Mecanismos de regulação ligam e desligam um gene de acordo com a necessidade de produtos daquele gene naquele momento. O momento de ação dessa atividade reguladora é em parte programado pelo genótipo e em parte determinado pelas células vizinhas. Até um biólogo sofisticado como Weismann foi incapaz de imaginar que fosse possível que o genótipo tivesse capacidades tão elaboradas; ele optou, então, pela solução errônea da divisão nuclear desigual. Mesmo hoje ainda não se sabe direito como os genes reguladores “sabem”, ou seja, percebem, quando é hora de ativar outros genes.

Depois se descobriu que o controle das primeiras clivagens celulares em muitos zigotos, em especial aqueles ricos em nutrientes no vitelo, se deve inteiramente a fatores maternos no citoplasma. Foi isso o que induziu Roux a erro. Os genes do zigoto só assumem o comando depois que os primeiros estágios do desenvolvimento estão completos. Como o ovário determina que material colocar em diferentes partes do vitelo e como ele transfere esse material adequadamente ainda é um mistério.

No nematóide *Caenorhabditis*, por exemplo, a célula fundadora de várias linhagens celulares diferentes recebe uma porção específica do citoplasma do óvulo que, acredita-se, contém fatores reguladores de origem materna. Por outro lado, em táxons com desenvolvimento regulador, como é o caso dos vertebrados, não há linhagens celulares iniciais fixas; há uma extensa migração de células; e a indução (a influência de tecidos existentes no desenvolvimento de outros tecidos) determina em grande parte a especificidade das células. Diferenças profundas nas vias de diferenciação podem ser encontradas não só entre nematóides e vertebrados, mas também entre espécies de filós mais proximamente aparentados — por exemplo, entre cordados (incluindo vertebrados) e equinoder-

mos. Há uma grande variedade de padrões de desenvolvimento, e alguns acontecem independentemente de todas as influências externas, enquanto outros são fortemente afetados por elas.

Formação dos folhetos germinativos

Os estudiosos do desenvolvimento no século XVIII, trabalhando com uma metodologia primitiva, pensaram que o coração fosse a primeira estrutura a aparecer na ontogenia, e que outros órgãos fossem aparecendo à medida que se tornavam necessários ao embrião em desenvolvimento. C. F. Wolff, Pander e Von Baer mostraram, no entanto, que esse não era o caso.

Na verdade, nas primeiras oito a doze clivagens de um embrião de rã, uma bola de células chamada blástula é formada. No centro oco dessa blástula, uma parte da camada exterior de células se “invagina”, resultando em uma gástrula com duas camadas. Finalmente, uma camada média chamada mesoderma se desenvolve (devido a uma gama de processos diferentes). As células que formam os três folhetos germinativos dão origem ao exterior da blástula. As que se tornarão o ectoderma são o hemisfério superior; as que estão na região equatorial são o mesoderma. A maior parte do hemisfério ventral se tornará o endoderma. Pander (1817) foi o primeiro a demonstrar a existência dessas três camadas celulares no pintinho em desenvolvimento, e poucos anos mais tarde Von Baer (1828) mostrou que a produção dos três folhetos caracterizava o desenvolvimento em todas as classes de vertebrados. Cada folheto germinativo dava origem a um conjunto particular de sistemas de órgãos: o ectoderma originava a pele e o sistema nervoso, o endoderma produzia o sistema intestinal, e o mesoderma, os músculos, o tecido conjuntivo e o sistema sangüíneo.

Depois da década de 1830, a aplicação da teoria celular aumentou a compreensão dos pesquisadores de como se desenvolviam os

três folhetos germinativos. Logo eles se deram conta de que todos os grupos de invertebrados, especialmente os celenterados, também apresentavam ectoderma e endoderma. Também que os folhetos germinativos eram os mesmos em todos os grupos de organismos, consistindo em uma invaginação do ectoderma da blástula, que resultava na formação da gástrula.⁷

No final da década de 1870 surgiram dúvidas consideráveis sobre se as mesmas camadas davam origem às mesmas estruturas em todos os organismos e, particularmente, sobre a relação entre o mesoderma e os outros dois folhetos germinativos. Experimentos com regeneração, tratamento com várias substâncias químicas e a análise de patologias indicavam que os folhetos germinativos podiam assumir papéis muito diferentes dos normais.

Uma nova era no estudo do potencial dos folhetos germinativos começou quando novos métodos cirúrgicos foram introduzidos na biologia experimental — especialmente experiências com transplante. Elas mostraram que, quando um pedaço de um folheto germinativo era transplantado para um novo sítio no embrião ou cultivado num meio de cultura, freqüentemente ele se desenvolvia de maneira diferente da que ocorreria se estivesse em sua posição normal. Por exemplo, o ectoderma isolado não se diferenciava em tecido nervoso num meio de cultura; só formava epiderme quando privado da influência de células dos outros folhetos. Quando tecidos de um embrião de anfíbio em seus primeiros estágios foram implantados na cavidade abdominal, tanto tecidos ectodérmicos quanto endodérmicos puderam se diferenciar em estruturas geralmente produzidas pelas outras camadas germinativas. O resultado de todos esses experimentos foi que a doutrina da especificidade absoluta dos folhetos germinativos, amplamente adotada no último século, não podia mais se sustentar. Os folhetos germinativos pareciam ter uma potencialidade normal quando estavam em sua relação normal com os outros folhetos ou comple-

xos celulares, mas revelavam potencialidades adicionais quando o relacionamento normal era perturbado.

Além disso, descobriu-se que os folhetos germinativos não retêm a sua integridade durante todo o processo de desenvolvimento. Em vez disso, muitas células embrionárias empreendem longas migrações. O mesoderma, por exemplo, pode ser formado de células que migram a partir do ectoderma *ou* do endoderma. Células de pigmento e neurônios nos embriões dos vertebrados fazem longas migrações de seu local de origem, na crista neural. Em alguns casos, as células migrantes são atraídas por estímulos químicos emanados da região-alvo, num processo conhecido como indução.

Indução

Por volta de 1900, a distinção entre tecidos ou órgãos que parecem se desenvolver de acordo com um programa genético fixo (desenvolvimento determinado) e outros que são afetados por tecidos ou estruturas adjacentes (desenvolvimento regulador), feita inicialmente por Roux, levou a um novo conceito na embriologia experimental chamado “indução”. Esse termo se refere a todos os casos em que um tecido afeta o desenvolvimento subsequente de outro tecido.

O fenômeno foi claramente demonstrado pela primeira vez por Spemann (1901) para o olho do embrião de rã. O cristalino é formado pelo ectoderma do cristalino, mas ele não se desenvolve se o mesoderma subjacente (cálice oftálmico) estiver destruído ou for removido. Na época se supôs que o cálice oftálmico induz a formação do cristalino. Spemann testou sua descoberta, transplantando o cálice oftálmico para outras partes do corpo, a fim de verificar se o ectoderma de diferentes regiões do corpo tinha a mesma capacidade de formar o cristalino. E, de fato, tinha. Finalmente, ele remo-

veu o ectoderma local da região do olho e o substituiu por ectoderma de outras partes do corpo, e novamente o cristalino se formou. Subseqüentemente, outros autores obtiveram diferentes resultados, primariamente quando trabalharam com outras espécies de rã. Às vezes havia o “desenvolvimento livre do cristalino” mesmo depois de o cálice oftálmico ter sido removido. Spemann finalmente concluiu que uma grande região do ectoderma da cabeça possuía, de fato, a predisposição para originar o cristalino.

Em uma outra série de experimentos com transplante, Spemann mostrou que uma porção do lábio dorsal do blastóporo induzia a formação de tecido do tubo neural no intestino primitivo. Ele conjecturou que um “organizador” fosse responsável por esse efeito. Esse artigo científico — publicado em 1924 em co-autoria com Hilde Mangold, que havia feito a maior parte do trabalho técnico — causou grande sensação e resultou em uma atividade quase febril entre os embriologistas experimentais. Foi demonstrado que até organizadores “mortos” e substâncias inorgânicas são às vezes capazes de induzir a formação do tubo neural.

O próprio Spemann e muitos outros em seu campo acabaram parando de trabalhar ou se voltaram para outros problemas, mas hoje está claro que eles estavam no caminho certo. Recentemente foi isolada uma proteína que parece ter a capacidade de induzir a formação de tecido neuronal. Uma revisão de todos os experimentos no campo mais tarde levou Spemann a ver a indução como uma interação complexa entre o tecido indutor e o induzido.⁸

Independentemente da natureza do sinal químico mandado pelo tecido indutor ao induzido, está bem estabelecido que a indução desempenha um papel importante no desenvolvimento de organismos com desenvolvimento regulador (como os vertebrados). O estudo da interação entre as células e os tecidos durante a ontogenia, particularmente o comportamento dependente de posição apresentado pelas células, tornou-se hoje uma

área independente da biologia (a topobiologia), na qual as propriedades das membranas celulares são destacadas para análise específica. Está claro agora que a interação entre células e tecidos desempenha um papel importante no desenvolvimento de quase todos os organismos, exceto talvez alguns com desenvolvimento determinado estrito.

Recapitulação

Os naturalistas, desde Meckel-Serrès e Von Baer, sempre se interessaram pelas implicações evolutivas do desenvolvimento. Em meados da década de 1820, Rathke descobriu as fendas e bolsas branquiais dos embriões de aves e mamíferos — uma observação que se encaixava perfeitamente no pensamento do período, da “grande escala da perfeição” (*scala naturae*). Se todos os organismos adultos podiam ser dispostos em uma série do menos para o mais perfeito, por que seus embriões não poderiam passar por uma série equivalente de estágios, refletindo cada um deles os arquétipos prévios de perfeição menor? Certamente as fendas branquiais indicavam um estágio de peixe, e estágios embrionários anteriores àquele representavam a recapitulação de tipos ainda mais primitivos.

Assim nasceu a teoria da recapitulação, também chamada de lei de Meckel-Serrès: os organismos recapitulam, durante a sua ontogenia, os estágios filogenéticos pelos quais seus ancestrais passaram. O pensamento evolucionista no período pré-darwinista ainda era confuso, mas a recapitulação se adequava a uma noção disseminada na época de que organismos “mais elevados” na escala da perfeição passavam por estados filogenéticos anteriores durante a sua ontogenia.

Mesmo confirmando a semelhança entre alguns estágios ontogenéticos e os tipos “inferiores”, Von Baer rejeitou categorica-

mente a interpretação evolutiva. Para ele, os estágios anteriores do desenvolvimento eram apenas mais simples e homogêneos, ao passo que os estágios posteriores eram mais especializados, mais heterogêneos; toda ontogenia era um deslocamento do mais simples para o mais complexo (isso ficou conhecido como “lei de Von Baer”). Interpretações teleológicas eram aceitáveis para Von Baer, mas qualquer coisa que se parecesse com a teoria da origem comum de Darwin não era.

A situação foi diferente no caso de Ernst Haeckel. Mais do que ninguém, Haeckel enfatizou o aspecto de recapitulação do desenvolvimento, propondo que o estágio de gástrula correspondia à evolução dos invertebrados e que estágios posteriores do desenvolvimento correspondiam à evolução de “tipos” de organismos “superiores”. Logo depois da publicação da *Origem*, de Darwin, Haeckel proclamou a “lei biogenética fundamental”: “A ontogenia recapitula a filogenia”. Isso imediatamente despertou um interesse enorme na embriologia comparativa, e os estudiosos da ontogenia começaram a achar que encontravam confirmações das alegações de Haeckel para onde quer que olhassem. Por alguns anos no final do século XIX, a embriologia se transformou em uma procura por ancestrais comuns com o auxílio de evidências da recapitulação.

Mas, no geral, os embriologistas tendiam a rejeitar a teoria da recapitulação, em particular suas versões mais extremas, em prol da lei de Von Baer. A razão para tal escolha era eminentemente teórica. Eles não conseguiam pensar em nenhuma razão convincente pela qual um embrião precisasse passar por estágios ancestrais, e se sentiam mais confortáveis com uma mera progressão do simples para o complexo, como proposto por Von Baer. Com efeito, os embriões são geralmente mais simples e menos diferenciados que os adultos que deles resultam. No entanto, os apoiadores de Von Baer ignoraram o fato de que arcos branquiais e outras manifestações de recapitulação nunca são mais simples que o desenvolvi-

mento posterior. A lei de Von Baer não explicou a recapitulação; simplesmente varreu-a para debaixo do tapete.

GENÉTICA DO DESENVOLVIMENTO

No último quarto do século XIX, o desenvolvimento também foi estudado por um ramo da biologia que viria a ser chamado de genética. Mas esse novo campo não era homogêneo. Os estudiosos da hereditariedade logo se deram conta de que sua área consistia em dois ramos, um chamado de genética de transmissão, o outro conhecido como genética do desenvolvimento ou fisiológica. A genética mendeliana, que lidava com o modo de transmissão dos fatores genéticos de uma geração para a outra, era pura genética de transmissão. A genética do desenvolvimento, por outro lado, lidava com a atividade desses fatores nos organismos durante a ontogenia. O fracasso de alguns biólogos, como Weismann, em separar esses dois aspectos da genética foi responsável por muitos dos mal-entendidos iniciais. O grande tento de T. H. Morgan foi separar claramente ambos os campos e se limitar estritamente à elucidação da genética de transmissão.

No mesmo período, outros autores se concentraram na genética do desenvolvimento, uma área cujo primeiro grande texto foi produzido por Richard Goldschmidt (1938). Muito daquilo que foi enunciado nessa área naquela época era pura especulação, e foi só depois da ascensão da biologia molecular que a genética do desenvolvimento começou a amadurecer. No entanto, publicações iniciais, como as de Waddington e Schmalhausen, já haviam mapeado a maioria dos problemas que são o objeto da pesquisa moderna no campo.

Uma nova era na genética do desenvolvimento foi aberta quando Avery (1944) demonstrou que o DNA era o portador da

informação genética. O DNA controla a produção das proteínas que compõem um organismo. O desenvolvimento, portanto, é a elaboração dos diferentes tipos de proteína durante a ontogenia e da combinação muito específica de proteínas que caracterizam os diferentes sistemas de órgãos. Embora os fundadores da genética moderna tivessem plena consciência da conexão entre os genes e desenvolvimento, eles não conseguiram — com efeito, nem ao menos tentaram a sério — produzir uma síntese de genética e desenvolvimento.

A genética clássica punha a ênfase nos genes individuais. Mas, naquela época, a contribuição de um dado gene para o desenvolvimento só podia ser determinada por meio do estudo de mutações, especialmente mutações deletérias ou letais. Não havia maneira de estudar a contribuição de um gene normal (ou, como se dizia na época, de “tipo selvagem”) para o desenvolvimento. Com efeito, a análise dos genes deletérios foi o método de escolha da genética do desenvolvimento da década de 1930 em diante. Ela produziu resultados modestos, freqüentemente apontando o tecido específico ou mesmo o folheto germinativo envolvido na mutação. A análise também mostrou que a maioria das mutações consistia em uma falha em produzir determinado produto de gene, mas não ajudou a determinar a natureza bioquímica de tal deficiência.

Mesmo que a natureza química do produto do gene tenha continuado desconhecida, esses estudos demonstraram claramente que dado gene em geral está ativo durante o desenvolvimento apenas em tecidos específicos e em estágios específicos desse desenvolvimento. A partir desse reconhecimento, foi possível descrever o desenvolvimento como sendo uma sequência ordenada de expressão de genes.

O reconhecimento, proporcionado pela biologia molecular, de que o gene não é uma proteína e não forma ele mesmo um dos tijolos fundamentais do embrião em desenvolvimento, e sim que o genótipo é simplesmente o conjunto de instruções necessárias para a construção de um embrião, teve um impacto profundo sobre a metodologia e sobre a conceituação da genética do desenvolvimento. Quando os detalhes sobre a ação do gene começaram a ser elucidados, nos anos 1960 e 1970, tornou-se evidente a razão pela qual nossos esquemas explanatórios prévios haviam sido insuficientes.

Não apenas os genes são compostos, consistindo em éxons que são transcritos e em íntrons que são cortados antes da produção de proteínas, mas além dos genes estruturais, que produzem enzimas, há também genes e seqüências reguladores. Enfim ficou claro, como havia sido cautelosamente sugerido nos anos 1880, que um gene pode ser ligado ou desligado sempre que seu produto se torna necessário. Além disso, a revolução molecular nos ajudou a apreciar o fato de que as células são caracterizadas pelas proteínas que produzem.⁹

O sistema inteiro, do DNA nuclear, passando pelo RNA mensageiro até os polipeptídeos e proteínas, e a contínua interação de todo esse aparato com seu ambiente celular, mostrou-se muito mais complexo do que se pensara antes. A conquista ideal da biologia molecular seria descobrir todos os genes envolvidos no desenvolvimento, determinar a contribuição exata de cada um, incluindo a natureza química do produto genético relevante e o papel que essa molécula desempenha no desenvolvimento, e analisar o maquinário regulatório que funciona como temporizador da atividade de cada gene. Surpreendentemente, os cientistas do desenvolvimento estão no caminho de atingir esse objetivo para alguns organismos.

O maior progresso foi feito com criaturas que têm um desenvolvimento determinado rígido, como os nematóides e a *Drosophila*. No caso do nematóide *Caenorhabditis elegans*, por exemplo, mais de cem genes com mais de mil mutações foram mapeados. Além disso, o DNA de muitos desses genes foi seqüenciado, e a seqüência exata de pares de bases, estabelecida. O nematóide adulto tem um número fixo de 810 células não-gonadais, e por meio do estudo das linhagens celulares foi possível determinar quais órgãos derivam de quais células nas primeiras clivagens.

A *Drosophila* (mosca-das-frutas), outro organismo com desenvolvimento determinado, tem algumas desvantagens como estudo de caso, como o número muito maior de genes, mas isso é mais do que compensado por vantagens morfológicas e genéticas. Primeiro, quando os estudos modernos de desenvolvimento começaram já havia um enorme inventário de mutações de *Drosophila* disponíveis. Além disso, a posição de cada uma dessas mutações nos cromossomos já havia sido determinada. Os cromossomos salivares gigantes da *Drosophila* também costumam permitir a elucidação da natureza das mutações.

Mas o mais importante de tudo é que a *Drosophila* é um organismo metamérico [segmentado] e, por meio de análise genética, os pesquisadores podem determinar quais genes contribuem para o desenvolvimento de quais segmentos. Há cinco segmentos na cabeça, três segmentos torácicos e de oito a onze segmentos abdominais; sabe-se de vários genes que afetam tanto segmentos quanto grupos de segmentos específicos. Boa parte da função desses genes já foi estabelecida. Especialmente interessante é uma comparação dos efeitos de diferentes alelos (versões de um gene) no mesmo *locus* gênico.

Bem menos progresso fez o ramo da análise genética de organismos com desenvolvimento regulador, como os vertebrados. Nessas espécies, as células ainda não estão comprometidas antes do estágio de desenvolvimento de dezesseis a 32 células. Talvez a maior

contribuição para a compreensão do desenvolvimento tenha sido dada pelo estudo das doenças genéticas humanas, ou seja, das mutações que resultam em mudanças deletérias no fenótipo. Isso permitiu aos pesquisadores atribuir uma grande porcentagem de mutações a cromossomos específicos. Sem dúvida, no decorrer do Projeto Genoma Humano, todas as mutações serão um dia localizadas. Mas, considerando a natureza reguladora do desenvolvimento, a constância com que a indução ocorre e o amplo grau de migração de alguns complexos de células, freqüentemente será difícil estabelecer uma relação unívoca entre genes específicos e aspectos específicos do desenvolvimento do fenótipo.* Os sistemas de desenvolvimento dos organismos com desenvolvimento regulador são consideravelmente mais complexos que os das espécies com desenvolvimento determinado. Pode ser que tenhamos de nos dar por satisfeitos com conclusões genéricas.

Um dos desdobramentos mais empolgantes da embriologia molecular tem sido a descoberta de que alguns conglomerados de genes estão amplamente disseminados entre grupos de animais distantemente aparentados. Os chamados genes *Hox* foram descobertos a princípio na *Drosophila*, mas, através do seqüenciamento genético, acabaram sendo achados também em camundongos, em um anfíbio, em um nematóide e em outros animais. Nos vertebrados, por exemplo, há quatro conjuntos de genes *Hox*. Eles parecem codificar o posicionamento relativo de uma estrutura em um organismo, não a estrutura em si. Genes *Hox* homólogos também foram encontrados na maioria dos filos de invertebrados, dos

* O rascunho do genoma humano foi concluído em 2000, três anos depois da publicação deste livro, e revelou que a localização de todas as mutações é uma tarefa muito mais complexa do que imaginavam os cientistas, como Mayr corretamente apontou. Uma iniciativa nesse sentido é o chamado mapa dos haplótipos (HapMap), que tenta mapear mutações comuns a vários grupos humanos. (N. T.)

celenterados e platelmintos até os artrópodes, moluscos e equinodermos. Um certo número de genes *Hox*, juntamente com alguns outros genes de controle do desenvolvimento, são tão disseminados entre os filos animais que Slack e colegas (1993: 491) sugeriram que esse conjunto de genes (que eles chamam de “zoótipo”) reflete parte do genoma do metazoário ancestral. Essa assembléia de genes tem inquestionavelmente uma idade filogenética muito antiga. Mas quais desses genes também são encontrados nos ancestrais protistas dos animais ainda é uma incógnita.

DESENVOLVIMENTO E BIOLOGIA EVOLUTIVA

Durante um bom tempo, quando a maioria dos geneticistas pensava que a evolução era simplesmente uma mudança na frequência de genes, o papel do desenvolvimento nas mudanças macroevolutivas foi ignorado. Nos últimos anos, sobretudo depois da aceitação relutante do darwinismo pelos biólogos do desenvolvimento, uma ênfase legítima tem sido colocada nesse interessante aspecto do desenvolvimento.

O indivíduo, que é o principal alvo da seleção, é produto da interação, no decorrer da evolução, de todos os seus genes um com o outro e com o ambiente. Essa interação impõe limites estreitos às mudanças evolutivas permissíveis. A demonstrar esse fato está a uniformidade fenotípica da maioria das espécies. Qualquer desvio do morfotipo-padrão da espécie será eliminado por meio de seleção estabilizadora ou normalizadora (ver o capítulo 9).¹⁰ O estudo dessas limitações ontogenéticas sobre a evolução se tornou uma das principais áreas de interesse da moderna biologia do desenvolvimento.

Genes e conjuntos de genes diferentes se ativam em diferentes estágios do desenvolvimento do zigoto. Os biólogos do desenvolvimento acreditaram por muito tempo que os genes ativos perto do

fim do desenvolvimento são aqueles que foram adquiridos por último durante a filogenia, e, da mesma forma, que os genes ativos mais cedo no desenvolvimento são os genes “mais velhos” de um organismo. Qualquer mudança em um gene recente, acreditava-se, teria apenas um efeito pequeno no fenótipo, como, digamos, o de alterar o grau de dimorfismo sexual ou o de afetar um componente comportamental de um mecanismo de isolamento, enquanto uma mutação em um dos genes mais antigos poderia levar a uma mudança fundamental em todo o processo de desenvolvimento — sendo, portanto, provavelmente deletéria.

Muitas objeções foram levantadas contra uma interpretação literal demais desse conceito, e mesmo assim há várias observações que sugerem que ele seja mesmo válido. Nesse caso, isso explicaria uma miríade de fenômenos evolutivos, como a exuberância da produção de novos tipos estruturais no Pré-Cambriano e no Cambriano Inferior, quando o genótipo dos metazoários ainda era jovem, em contraste com a relativa estabilidade de tipos estruturais desde então. Explicaria também, por exemplo, por que as inovações evolutivas em geral se devem a uma mudança de função em uma estrutura que foi adquirida gradualmente para desempenhar uma função diferente. Tal mudança de função tem a vantagem de demandar apenas uma reestruturação mínima do genótipo.

O reconhecimento de que cada indivíduo é um sistema de desenvolvimento que reage à seleção mais ou menos como um sistema integrado explica também dois fenômenos evolutivos que durante muito tempo intrigaram os estudiosos do desenvolvimento. O primeiro deles é a existência de estruturas vestigiais. A maioria dos genes e dos grupos de genes tem efeitos amplos, e, mesmo quando uma das manifestações fenotípicas de um desses grupos de genes — digamos, a presença de um dedo vestigial — não é mais apoiada pela seleção natural, esse caractere vestigial não se perde enquanto os genes que o controlam ainda tiverem outras

funções — digamos, a manutenção dos outros dedos. Se é assim, ele será mantido pela seleção natural. O segundo fenômeno evolutivo é a recapitulação.

A recapitulação reconsiderada

De modo a explicar a recapitulação em termos aceitáveis para um biólogo moderno, devemos partir de uma nova base. O princípio de Meckel-Serrès foi proposto numa época em que a morfologia idealista dava as cartas. Haeckel e outros proponentes da recapitulação sabiam perfeitamente bem que nenhuma ave ou mamífero passava por um estágio embrionário que fosse exatamente igual a um peixe. Eles não alegaram, como acusaram seus oponentes, que os estágios embrionários das aves e dos mamíferos eram exatamente iguais aos estágios “adultos” de anfíbios ou de peixes. O que disseram foi que as fases embrionárias se pareciam com as fases “permanentes” de seus ancestrais. O que quiseram dizer com “permanentes” era que as fases ontogenéticas iniciais representavam os arquétipos antecedentes.¹¹ Com efeito, esses recapitulacionistas indicaram que as fases ontogenéticas iniciais muitas vezes haviam avançado mais do ponto de vista evolutivo que as fases adultas. Isso é verdadeiro sobretudo no caso de organismos nos quais as fases larvais são adaptadas para modos especiais de vida, como no caso das larvas de alguns organismos marinhos e de alguns parasitas.

Ao avaliar a teoria da recapitulação, é preciso distinguir dois conjuntos de questões: (1) As fases ontogenéticas realmente se assemelham às dos tipos ancestrais? Ou seja, a “recapitulação” ocorre de fato? (2) Se assim for, por que ela acontece? Por que há tal permanência dos estágios ontogenéticos ancestrais? A resposta à primeira questão é sim. Mas, no caso da segunda questão, é legítimo perguntar: Por que os mamíferos não desenvolvem a região do pescoço

diretamente, em vez de fazer essa passagem pelo arco branquial? A resposta é que o desenvolvimento do fenótipo não é controlado estrita, exclusiva e diretamente pelos genes, e sim pela interação entre o genótipo das células e desenvolvimento e seu ambiente celular. Em qualquer fase da ontogenia, a fase seguinte de desenvolvimento é controlada tanto pelo programa genético do genótipo quanto por um “programa somático” que consiste no embrião nesse estágio. Aplicando esse raciocínio ao problema do arco branquial, por exemplo, isso significa que o sistema do arco branquial é o programa somático para o desenvolvimento subsequente da região do pescoço das aves e dos mamíferos (Mayr, 1994).

Apesar do novo termo “programa somático”, essa interpretação tem mais de cem anos. A noção de que todas as fases do desenvolvimento são controladas em parte pelas fases prévias é há muito tempo uma das idéias fundamentais da biologia do desenvolvimento. Não existe, portanto, nada de misterioso na recapitulação, mas ela precisa ser divorciada do pensamento tipológico da morfologia idealista.

Apesar das muitas complexidades e variações existentes entre os vários grupos de organismos, o desenvolvimento inicial dos animais, refletido na formação e no desenvolvimento de folhetos germinativos (gastrulação), mostra uma grande semelhança entre os filos. De alguma forma, não consigo evitar a sensação de que esse estágio pode representar a recapitulação de uma condição ancestral. As teorias extravagantes de Haeckel tornaram esse pensamento altamente impopular, mas mesmo um olhar crítico para os fatos não me leva a uma interpretação diferente e superior.

Como ocorrem os avanços evolutivos

O sistema de desenvolvimento é tão bem amarrado que os biólogos freqüentemente falam na “coesão” do genótipo. Para os evolu-

cionistas, o problema é como essa coesão se desenvolveu e como ela é quebrada de modo a possibilitar grandes novos avanços evolutivos.

De acordo com um modelo que propus em 1954, a evolução progride de forma lenta em espécies grandes e populosas, ao passo que as mudanças evolutivas mais rápidas acontecem em populações fundadoras pequenas e periféricas isoladas.¹² Expresso em termos de desenvolvimento, isso significa que espécies grandes e populosas têm desenvolvimento estável, enquanto populações fundadoras pequenas podem carecer dessa estabilidade, o que as habilita a mudar rapidamente para um novo fenótipo através de uma reestruturação genética rápida. Eldredge e Gould (1972), usando a frase “equilíbrios pontuados”, aceitaram esse modelo e propuseram que a estase de desenvolvimento das espécies populosas pode durar milhões de anos. Pesquisas subsequentes confirmaram que isso de fato vale para muitas espécies. Esse modelo enfatiza de forma bem clara a importância do desenvolvimento na macroevolução. No entanto, não explica por que os genótipos de certas espécies são altamente estáveis, enquanto os de outras podem sofrer mudanças evolutivas rápidas. Essa diferença até hoje não foi explicada.

Esse modelo é quase exatamente o inverso de um proposto por Fisher e Haldane no começo dos anos 1930. De acordo com a visão desses estudiosos, a taxa de mudança evolutiva se correlaciona com a quantidade de variação genética em uma população ou espécie e, portanto, quanto maior e mais populosa uma espécie for, mais rápido ela evoluirá. Todas as pesquisas subsequentes refutaram a tese de Fisher e Haldane. Minha interpretação é que, quanto mais populosa for a espécie, mais interações epistáticas ocorrerão e mais tempo levará para uma nova mutação ou recombinação se espalhar pela espécie inteira — portanto, mais lentamente ocorrerá a evolução. Uma população fundadora, que apresenta menos variação oculta pelo fato de ter menos indivíduos, pode mais prontamente saltar para outro genótipo, ou, para usar

outra metáfora, para outro pico adaptativo. A mudança nas taxas evolutivas em populações ou espécies, causada por mutações ou por recombinação genética, é chamada de “heterocronia”.

Hoje se compreende bem que existe uma variação genética considerável em cada fase da hierarquia dos processos de desenvolvimento. Milkman (1961) mostrou de uma linda maneira quanta variação genética críptica pode haver em uma população natural para a expressão de um único caractere fenotípico. Muitas propriedades morfológicas são evidentemente relacionadas de perto com processos fisiológicos. A pressão seletiva sobre esses processos fisiológicos pleiotrópicos muitas vezes é responsável por mudanças morfológicas que de outra forma seriam inexplicáveis.

Ao comparar as mudanças no processo de desenvolvimento entre raças geográficas diferentes e espécies proximamente aparentadas, os biólogos do desenvolvimento deveriam poder mostrar quais tipos de mudanças de desenvolvimento são possíveis entre parentes próximos e quais não são. Para o azar de estudos como esse, a metodologia tradicional dos biólogos do desenvolvimento tem permitido, quando não favorecido, o pensamento tipológico. O pensamento populacional darwinista raramente foi exigido em suas pesquisas. Poucos dentre eles, como Waddington, apreciaram a existência da variação, mas a aceitação gradual do pensamento populacional entre os biólogos do desenvolvimento tem sido um processo lento. No passado, os biólogos do desenvolvimento tendiam a ir de suas análises para sistemas-modelo no laboratório — o pinto, a rã, a *Drosophila* — e iam direto do fenótipo para o nível do gene. Até recentemente, eles não conseguiam aproveitar o caminho verdadeiramente responsável pela maior parte dos eventos macroevolutivos, a variação geográfica.

Mesmo com tudo isso, em nenhum outro ramo da biologia os aspectos explicativos das ciências da vida são representados de maneira tão exemplar quanto na biologia do desenvolvimento.

Essa disciplina é altamente analítica (muitas vezes erroneamente chamada de reducionista) e tem o objetivo de determinar qual é a contribuição de cada gene para o processo do desenvolvimento. Ao mesmo tempo, é holística, uma vez que o desenvolvimento viável depende da influência do organismo como um todo, refletida na interação entre os genes e os tecidos. A decodificação do programa genético representa a causa próxima dos processos ontogenéticos, enquanto o conteúdo do programa genético é o resultado de causas últimas (evolutivas). É nessa riqueza de fatores e causas que residem o fascínio e a beleza do mundo vivo.¹³

9. Perguntas do tipo “Por quê?”: a evolução dos organismos

Na Idade Média, e até quase o tempo de Darwin, as pessoas acreditavam que o mundo fosse constante e muito jovem. Mas a credibilidade dessa visão de mundo cristã já havia sido enfraquecida em algumas frentes por uma série de avanços científicos. O primeiro deles foi a revolução copernicana, que removeu a Terra e seus habitantes humanos do centro do cosmos e, no caminho, demonstrou que nem tudo o que está escrito na Bíblia precisava ser interpretado ao pé da letra. O segundo avanço foram as pesquisas dos geólogos, que revelaram a grande idade da Terra. Em terceiro, a descoberta de faunas extintas fossilizadas refutou a teoria de que a biota da Terra permaneceu imutável desde a Criação.

Apesar de estas e de muitas outras evidências terem abalado a teoria de um mundo constante e de curta duração (e apesar de dúvidas a esse respeito terem sido expressas nos escritos de Buffon, Blumenbach, Kant, Hutton e Lyell, bem como na teoria completa de Lamarck sobre a mudança evolutiva), uma visão de mundo mais ou menos bíblica predominou no Ocidente até 1859. Ela era popular não somente entre leigos, mas também entre a maioria

dos naturalistas e dos filósofos. Uma longa série de avanços foi necessária antes que o evolucionismo — que postula um mundo de longa duração e em transformação constante — fosse plenamente estabelecido. Pode nos parecer estranho hoje, mas o conceito de evolução era algo alheio ao mundo ocidental.

OS MÚLTIPLOS SIGNIFICADOS DE “EVOLUÇÃO”

A palavra “evolução” foi introduzida na ciência por Charles Bonnet, aplicada à teoria pré-formacionista do desenvolvimento embrionário (ver o capítulo 8), mas a biologia do desenvolvimento não a usa mais nesse sentido. A evolução também foi aplicada a três conceitos na história da vida na Terra, e ainda é usada em um deles.

A evolução transmutacional (ou transmutacionismo) diz respeito à origem repentina de um novo tipo de indivíduo através de uma grande mutação ou saltação; esse indivíduo se torna o progenitor de uma nova espécie, através de seus descendentes. Idéias saltacionistas, embora não sob o rótulo de evolução, têm sido propostas desde os gregos até Maupertuis (1750). Mesmo depois da publicação da *Origem*, de Darwin, teorias saltacionistas foram adotadas por muitos evolucionistas — inclusive por T. H. Huxley, amigo de Darwin —, que não conseguiam aceitar o conceito de seleção natural.

A evolução transformacional, por outro lado, se refere à mudança gradual de um objeto, tal como o desenvolvimento de um óvulo fertilizado em um adulto. Todas as estrelas passam por uma evolução transformacional, como no caso das estrelas amarelas que se convertem em vermelhas. Quase todas as mudanças no mundo inanimado, como a elevação de uma cadeia de montanhas, devido às forças tectônicas, ou sua subsequente destruição, pela erosão, são

dessa natureza, se é que são direcionadas. No que diz respeito ao mundo animado, a teoria da evolução de Lamarck, que precedeu a de Darwin, era transformacional. De acordo com Lamarck, a evolução consiste na origem, por geração espontânea, de um novo organismo simples, um infusor, e na sua transformação gradual em uma espécie superior, mais perfeita. A teoria de Lamarck da evolução transformacional, apresentada em seu *Philosophie zoologique* (1809), embora tenha sido amplamente adotada durante um tempo, foi substituída na maior parte do mundo pela teoria de Darwin.

A evolução variacional é o conceito representado pela teoria darwinista da evolução por meio da seleção natural. De acordo com essa teoria, uma quantidade enorme de variação genética é produzida a cada geração, mas apenas uns poucos sobreviventes dentre os gerados na vasta prole acabarão, eles mesmos, se reproduzindo. Os indivíduos mais bem adaptados ao ambiente têm maior probabilidade de sobreviver e de produzir a geração seguinte. Devido (1) a uma seleção continuada (ou sobrevivência diferencial) de genótipos mais capazes de lidar com as mudanças no ambiente, (2) à competição entre os novos genótipos na população, e (3) a processos estocásticos (que ocorrem ao acaso) que afetam a frequência de genes, haverá uma mudança contínua na composição de cada população, e essa mudança é chamada de evolução. Uma vez que todas as mudanças acontecem em populações de indivíduos que são geneticamente únicos, a evolução é necessariamente gradual e contínua, à medida que as populações são reestruturadas geneticamente.

Em seus escritos iniciais (os Cadernos), Darwin demonstra ter consciência de duas dimensões evolutivas: tempo e espaço. A transformação no tempo (evolução filética) lida com mudanças em adaptação, como quando uma espécie qualquer adquire novas características. Mas esse conceito por si só nunca será capaz de explicar a extraordinária diversificação da vida, porque ele não

permite que o número de espécies cresça. A transformação no espaço (especiação e multiplicação de linhagens) lida com o estabelecimento de diversas novas populações fora dos limites geográficos da população-mãe, e com a sua transformação em novas espécies e, eventualmente, em táxons superiores. Essa multiplicação das espécies é chamada especiação.

Lamarck não tinha absolutamente nada a dizer sobre o aspecto geográfico (especiativo) da evolução. Com efeito, sendo um transformacionista e tendo aceito a geração espontânea, ele não parece ter se dado conta de que a pergunta “Como se multiplicam as espécies?” precisava ser feita. Até Darwin ignorou o assunto em seus escritos posteriores. Os paleontólogos, no tempo de Darwin e nas décadas que se seguiram, continuaram aderindo à idéia de que a evolução filética era a única que de fato importava. Somente nos anos 1930 e 1940, nas obras de Dobzhansky e Mayr, foi finalmente enfatizado que a evolução é uma transformação tanto no espaço quanto no tempo, e que a origem da diversidade orgânica através da especiação era tão importante para a biologia evolutiva quanto o eram as mudanças adaptativas no âmbito de uma linhagem.

A origem das espécies, de Darwin, estabeleceu cinco grandes teorias relacionadas com diferentes aspectos da evolução variacional: (1) que os organismos evoluem continuamente ao longo do tempo (o que poderíamos chamar de teoria da evolução em si); (2) que diferentes tipos de organismo descendem de um ancestral comum (a teoria da origem comum); (3) que as espécies se multiplicam ao longo do tempo (a teoria da multiplicação das espécies ou especiação); (4) que a evolução se dá por meio de mudanças graduais nas populações (a teoria do gradualismo); (5) que o mecanismo da evolução é a competição entre grandes números de indivíduos únicos por recursos limitados, o que leva a diferenças em sobrevivência e reprodução (a teoria da seleção natural).

Na *Origem*, Darwin apresentou um grande número de evidências em favor da teoria de que os animais evoluem com o tempo. Nas décadas seguintes, os biólogos procuraram e encontraram evidências abundantes e favoráveis — e nenhuma contrária — à idéia de que a evolução em si ocorreu. Após mais de um século transcorrido desde o tempo de Darwin, essas evidências se tornaram tão esmagadoras que os biólogos não mais se referem à evolução como uma teoria, e sim consideram-na um fato — tão bem estabelecido quanto o fato de que a Terra gira em torno do Sol e é redonda, não plana. Como disse Dobzhansky: “Nada na biologia faz sentido, exceto à luz da evolução”. Ao considerar a evolução como um fato estabelecido, nenhum evolucionista perde mais seu tempo procurando evidências adicionais dela. Somente quando refutamos os criacionistas é que nos damos ao trabalho de reunir as evidências poderosas que se acumularam nos últimos 130 anos para provar a evolução.

A origem da vida

Uma objeção à teoria da evolução que foi levantada pelos primeiros adversários de Darwin foi o raciocínio segundo o qual ele podia ter explicado como organismos derivam de outros organismos, mas não havia explicado a origem da vida propriamente dita a partir da matéria inanimada. As pesquisas de Louis Pasteur e de outros, que demonstraram a impossibilidade da geração espontânea em uma atmosfera rica em oxigênio, parecia dar forte apoio à idéia de que a vida não pode surgir por causas naturais, reque-rendo portanto alguma origem sobrenatural, um Criador.

Descobriu-se desde então que, diferentemente dos tempos atuais, não havia oxigênio na atmosfera da Terra primitiva quando

a vida se originou (apenas traços dele).¹ Experimentos conduzidos por Stanley Miller (1953) mostraram que cargas elétricas disparadas numa mistura gasosa de metano, amônia, hidrogênio e vapor d'água num frasco resultariam na produção de aminoácidos, uréia e outras moléculas orgânicas. Tais moléculas orgânicas poderiam ter se acumulado quando nossa atmosfera era destituída de oxigênio, e, com efeito, moléculas similares têm sido desde então encontradas em meteoritos e no espaço interestelar.

Existem hoje numerosas hipóteses para explicar como a vida, especialmente as proteínas e o RNA, pode ter emergido de uma combinação entre essas moléculas orgânicas. Vários desses cenários prebióticos são bastante convincentes, mas, na ausência de fósseis químicos das fases intermediárias, talvez nunca consigamos provar qual deles é o correto. Seria de esperar que os primeiros organismos fossem heterótrofos, ou seja, que utilizassem compostos orgânicos produzidos prebioticamente que estivessem à disposição no ambiente. Os organismos tinham de produzir as macromoléculas maiores, como as proteínas e os ácidos nucleicos, mas não precisavam sintetizar *de novo* aminoácidos, purinas, pirimidinas e açúcares. Os compostos orgânicos mais simples formados naturalmente reagiam para formar polímeros e, por fim, compostos de complexidade cada vez maior.

O assunto da origem da vida é extremamente complexo, mas não é mais o mistério que um dia foi, no período imediatamente posterior a Darwin. Com efeito, não há mais nenhum obstáculo fundamental para explicar, com base nas leis da química e da física, como a vida surge a partir da matéria inanimada.

Após retornar de sua viagem a bordo do *Beagle*, nos anos 1830, Darwin concluiu que as três espécies de tordo nas ilhas Galápagos deveriam ter derivado de uma única espécie de tordo do continente sul-americano. Assim, uma espécie poderia produzir várias espécies descendentes. Faltava apenas um pequeno passo, a partir dessa descoberta, para postular que todos os tordos derivavam de um ancestral comum, e da mesma forma todos os pássaros canoros, todas as aves, todos os vertebrados, todos os animais e, finalmente, todas as formas de vida. Cada grupo de organismos havia derivado de uma espécie ancestral comum. A novidade da teoria de Darwin foi que ele propôs uma árvore filogenética ramificada, que contrastava com a escada linear e única da *scala naturae*, que havia sido tão amplamente adotada no século XVIII.

A teoria de Darwin era persuasiva porque fornecia uma explicação para diversos fenômenos biológicos que, até aquela época, tinham de ser registrados como sendo simplesmente aspectos curiosos do mundo ou evidências de um planejamento por parte do Criador. Primeiro, a teoria de Darwin da origem comum fornecia a explicação para a descoberta dos anatomistas comparados, em especial Cuvier e Owen, de que os organismos se dividem em grupos bem definidos que são construídos de acordo com um plano (ou tipo estrutural, ou morfotipo) comum, e isso permite a reconstrução de um arquétipo definido para cada grupo. A teoria da evolução pela origem comum também explicava a origem da hierarquia lineana e, mais convincentemente, explicava o padrão de distribuição geográfica da biota devido à disseminação gradual dos organismos por todos os continentes e a suas radiações adaptativas nas novas áreas aonde eles chegavam.

A origem comum se tornou o eixo teórico do pensamento evolutivo darwinista desde a publicação da *Origem*. Isso não é

nenhuma surpresa, uma vez que ela tem poderes explicativos tão extraordinários. Com efeito, as manifestações da origem comum, reveladas pela anatomia comparada, pela embriologia comparada, pela sistemática e pela biogeografia, eram tão convincentes que a evolução pela origem comum foi aceita pela maioria dos biólogos em apenas uma década após a publicação da *Origem*.

O quanto essa origem comum poderia ser estendida foi a princípio objeto de controvérsia, ainda que Darwin tivesse, ele mesmo, sugerido que “todas as nossas plantas e animais [descenderam] de uma única forma, na qual a vida foi soprada pela primeira vez”. De fato, logo foram descobertos protistas que combinavam características de plantas e animais, e de tal maneira que a classificação de alguns desses intermediários ainda é debatida. O último tijolo no edifício teórico da origem comum foi assentado neste século, quando os biólogos moleculares descobriram que até as bactérias, que não têm núcleo celular, possuem não obstante o mesmo código genético que os protistas, os fungos, as plantas e os animais.

A teoria da origem comum estimulou enormemente a taxonomia (ver o capítulo 7). Ela sugeria que os taxonomistas deveriam buscar o parente mais próximo de todo grupo de organismos, especialmente aqueles isolados, e reconstruir seu ancestral comum. Isso era mais sugestivo para animais do que para plantas, e certamente a construção de filogenias era o passatempo favorito dos zoólogos no período pós-darwinista. Ela estimulou em especial as pesquisas comparativas, nas quais toda estrutura e todo órgão eram estudados devido à possibilidade de serem homólogos a estruturas correspondentes em um organismo aparentado ou possivelmente ancestral. Uma estrutura era considerada homóloga à de outro organismo se ambas derivassem filogeneticamente de uma estrutura correspondente do suposto ancestral comum imediato. Quando o grau de parentesco de dois grupos era estabelecido por esse método, como no caso de répteis e aves, por exemplo, os

pesquisadores tentavam prever com o que se pareceria o seu ancestral comum. Daí o grande regozijo motivado pela descoberta de um desses “elos perdidos”, como aconteceu com o *Archaeopteryx* em 1861, um fóssil que era parte ave, parte réptil. Não que o *Archaeopteryx* fosse necessariamente um ancestral direto, mas ele indica por que fases a transição deve ter passado.

Esses estudos foram estendidos para o estudo comparado dos embriões, e logo se descobriu, como enfatizou especialmente Ernst Haeckel, que o curso do desenvolvimento individual (ontogenético) com frequência passava por estágios semelhantes a estágios correspondentes no grupo ancestral. Daí, por exemplo, todos os tetrápodes terrestres, durante a sua ontogenia, passaram por uma fase com arco branquial, recapitulando (por assim dizer) o desenvolvimento de guelras em seus ancestrais, os peixes. Uma versão amenizada da teoria da recapitulação tem bastante validade, embora não seja verdade que os animais recapitulam em sua ontogenia as fases adultas de seus ancestrais (ver o capítulo 8).

Com o tempo, foi possível reconstruir uma árvore filogenética confiável dos animais, enquanto os botânicos, com a ajuda de evidências moleculares, estão hoje a caminho de fazer o mesmo para as plantas. Em última instância, esse método também foi aplicado aos procariontes, que, segundo mostrou Woese, consistem em dois ramos, as Eubacteria e as Archaeobacteria. Essas descobertas permitiram que se propusesse uma nova classificação para todos os organismos (ver o capítulo 7).

A origem dos seres humanos

Talvez a consequência mais importante da teoria da origem comum tenha sido a mudança na posição do homem. Para teólogos e filósofos, o homem era uma criatura separada do restante dos seres vivos. Aristóteles, Descartes e Kant concordavam quanto a

isso, por mais que tenham discordado em outros aspectos de suas respectivas filosofias. Na *Origem*, Darwin se limitou a um comentário cauteloso e cifrado: “A origem do homem e a sua história serão iluminadas”. Mas Haeckel (1866), Huxley (1863) e o próprio Darwin (em 1871) demonstraram conclusivamente que os humanos devem ter evoluído de um ancestral simiesco, colocando assim a nossa espécie na árvore filogenética do reino animal. Isso foi o fim da tradição antropocêntrica que havia sido mantida pela Bíblia e pela maioria dos filósofos.

A TEORIA DA MULTIPLICAÇÃO DAS ESPÉCIES DE DARWIN

O conceito biológico de espécie define as espécies como agregados de populações que estão reprodutivamente isoladas umas das outras. Esse isolamento reprodutivo acontece devido a algumas características das espécies, como barreiras de esterilidade ou incompatibilidades de comportamento, que são coletivamente chamadas de mecanismos de isolamento. Eles evitam o intercruzamento de diferentes espécies nas áreas onde suas zonas de distribuição se sobrepõem. O problema da especiação é explicar como as populações adquirem tais mecanismos de isolamento e como elas podem evoluir gradualmente.² Hoje há uma concordância quase universal de que o principal processo de especiação é o geográfico, ou alopátrico — a divergência genética entre populações geograficamente isoladas. Ela ocorre de duas formas: especiação dicopátrica e especiação peripátrica.

Na especiação dicopátrica, uma zona de distribuição de populações até então contínua é interrompida pelo surgimento de uma nova barreira (uma cadeia de montanhas, um braço de mar ou uma descontinuidade de vegetação). Seja estritamente por

acaso, como no caso de incompatibilidades cromossômicas, seja por uma mudança de função no comportamento como consequência da seleção sexual (ver adiante), ou ainda como um subproduto incidental de uma transição ecológica, as duas populações separadas se tornarão cada vez mais distintas geneticamente no decorrer do tempo e, proporcionalmente a essa diferença, adquirirão mecanismos de isolamento que farão com que elas se comportem como espécies diferentes quando, mais tarde, entrarem novamente em contato uma com a outra. Hoje é quase certo que a maioria dos mecanismos de isolamento evoluem antes do momento em que as neo-espécies retomam contato. O isolamento pode passar por algum ajuste fino depois que o contato secundário é estabelecido, mas o fator de isolamento básico é o que se originou antes do contato.

Na especiação peripátrica, uma população fundadora se estabelece além da periferia da zona de distribuição da espécie anterior. Tal população, formada por uma única fêmea inseminada ou por uns poucos indivíduos, conterá apenas uma pequena proporção dos genes da espécie-mãe, e em geral uma combinação incomum deles. Simultaneamente, ela é exposta a um conjunto de pressões seletivas novo e freqüentemente severo, devido a mudanças em seu ambiente físico e biótico. Uma população fundadora semelhante pode sofrer uma modificação genética drástica e se especiar rapidamente. Além disso, uma população fundadora semelhante, devido a sua base genética estreita e a sua reestruturação genética drástica, está particularmente suscetível a sofrer inovações evolutivas, incluindo aquelas que podem conduzir a desdobramentos macroevolutivos.

Outros cenários têm sido propostos além dessas duas formas de especiação alopátrica, e alguns podem ocorrer. O mais provável deles é a especiação simpátrica, ou seja, a origem, devido a uma especialização ecológica, de uma nova espécie dentro da zona de

distribuição dos indivíduos da espécie-mãe. Altamente improvável é a chamada especiação parapátrica, o desenvolvimento da fronteira entre duas espécies ao longo de um gradiente ecológico* dentro da zona de distribuição de uma espécie.

A TEORIA DO GRADUALISMO DE DARWIN

Durante toda a sua vida, Darwin destacou a natureza gradual da mudança evolutiva. A gradação não apenas era uma consequência necessária do uniformitarismo de Lyell; a origem repentina de uma nova espécie teria parecido, para Darwin, uma concessão exagerada ao criacionismo. É claro, todas as espécies de determinado local eram demarcadas rigidamente uma em relação à outra, mas, quando comparava populações, variedades ou espécies geograficamente representativas, Darwin via evidências de gradação por toda parte.

Para nós, talvez mais até do que para Darwin, está claro que a evolução acontece em populações, e que as populações numa espécie sexuada só se modificam gradualmente, nunca por saltação. Há algumas exceções, como a poliploidia, mas elas nunca tiveram um papel importante na macroevolução.

Uma das objeções mais freqüentemente levantadas ao gradualismo de Darwin era que ele não era capaz de explicar a origem de órgãos, estruturas, capacidades fisiológicas e padrões de comportamento inteiramente novos. Por exemplo, como uma asa rudimentar poderia crescer devido à seleção natural antes que pudesse desempenhar as funções do vôo? Darwin propôs dois processos por meio dos quais inovações evolutivas poderiam ser

* Gradiente ecológico (*ecological escarpment*): uma zona com condições de vida diferentes, mas sem uma barreira física separando as populações. (N. T.)

adquiridas. Um deles foi chamado por Severtsoff (1931) de intensificação de função. Tomemos como exemplo a evolução do olho. Como um órgão tão complexo poderia ter sido criado pela seleção natural? No final ficou demonstrado que os primeiros órgãos fotorreceptores eram simples manchas sensíveis à luz na epiderme, e todas as outras propriedades acessórias dos olhos foram acrescentadas gradualmente no decorrer da evolução. Muitos dos estágios intermediários ainda existem em vários tipos de invertebrados. Tal intensificação de função responde pelas várias modificações dos membros posteriores dos mamíferos em toupeiras, baleias e morcegos, para citar apenas alguns exemplos.

No entanto, uma forma inteiramente diferente e muito mais dramática por meio da qual é possível adquirir novidades evolutivas é a mudança na função de uma estrutura. Aqui, uma estrutura preexistente — digamos, as antenas da *Daphnia* — adquire a função adicional de nadadeira e, sob uma nova pressão seletiva, fica maior e se modifica. As penas das aves supostamente surgiram como escamas modificadas de répteis para termorregulação, mas adquiriram uma nova função nos membros posteriores e nas caudas das aves, ligada ao voo.

Durante uma sucessão de funções, uma estrutura sempre passa por uma fase na qual ela é capaz de desempenhar simultaneamente as duas tarefas. As antenas da *Daphnia* são órgãos sensoriais e nadadeiras ao mesmo tempo. Alguns dos exemplos mais interessantes de mudança de função dizem respeito a padrões de comportamento, como quando o asseio das penas é incorporado às exibições de corte de alguns patos. Muitos mecanismos comportamentais de isolamento em animais provavelmente se originaram através da seleção sexual em populações isoladas, e assumiram sua nova função apenas quando a espécie estabeleceu contato com uma espécie aparentada.

Extinções em massa

A descoberta das extinções em massa foi a segunda objeção levantada contra a teoria de Darwin do gradualismo. Antes de Darwin, os catastrofistas, a começar por Cuvier, insistiam em que diversas extinções em massa aconteceram na história da vida, nas quais a biota então dominante foi dizimada, quando não totalmente exterminada, para ser substituída depois por uma nova biota. O registro fóssil sugeria um número considerável de mudanças drásticas desse tipo, como a do Permiano para o Triássico ou a do Cretáceo para o Terciário. O principal objetivo de *Principles of geology*, de Lyell, era refutar o catastrofismo e dar substância à tese de Hutton da mudança gradual na história da Terra. O gradualismo de Darwin espelhava a visão de Lyell. Portanto, foi uma surpresa geral quando as extinções em massa foram firmemente documentadas exatamente onde os catastrofistas as haviam previsto.

As extinções em massa são eventos cataclísmicos raros, sobrepostos ao ciclo darwinista normal de variação e seleção levando à mudança gradual. Darwin tinha plena consciência de que a extinção de espécies individuais e sua substituição por novas é contígua através da história da vida. Mas, além dessas extinções “de fundo”, houve períodos definidos — que o tempo todo têm servido como linhas demarcatórias entre as eras geológicas — nos quais uma grande parte da biota se extinguiu simultaneamente. O mais drástico desses períodos aconteceu no final do Permiano, quando mais de 95% das espécies desapareceram da Terra.

A causa das extinções em massa é debatida ainda hoje. O evento do final do Cretáceo, que dizimou os dinossauros, foi quase certamente consequência do impacto de um asteroide e das mudanças climáticas e ambientais que a ele se seguiram. Essa hipótese foi postulada pela primeira vez pelo geólogo Walter Alvarez em 1980, mas desde então tem se encontrado uma grande quantidade

de evidências que dão apoio a ela. Com efeito, a própria cratera de impacto foi identificada, perto da ponta da península de Yucatán, no México. Tentativas de atribuir as outras extinções em massa a impactos de asteroide não tiveram sucesso. A maioria delas parece, em vez disso, estar ligada ou a eventos tectônicos, que afetaram o tamanho das plataformas continentais oceânicas e a circulação das correntes, ou a outras mudanças no clima. Há alguma regularidade no intervalo entre essas extinções, e alguns autores têm postulado causas extraterrestres para elas, como flutuações na radiação solar — uma teoria plausível. No entanto, a maior parte das evidências em favor de explicações extraterrestres não resistiu ao escrutínio.

As espécies sortudas o suficiente para sobreviver a uma catástrofe que levou a uma extinção em massa são como os membros de uma população fundadora. Elas têm diante de si um ambiente biótico completamente diferente, e podem desbravar novas trilhas evolutivas. A ilustração mais espetacular dessa possibilidade está no começo do Terciário, quando ocorreu uma irradiação espetacular dos mamíferos, animais que haviam habitado a Terra por mais de 100 milhões de anos antes da extinção dos dinossauros.

A TEORIA DA SELEÇÃO NATURAL DE DARWIN

Durante muito tempo, depois que a teoria composta de Darwin da evolução gradual das espécies a partir de um ancestral comum foi amplamente aceita, diversas teorias concorrentes tentaram responder qual era o mecanismo que produzia a mudança evolutiva. Por oitenta anos, os defensores dessas teorias debateram um com o outro, até que, durante a síntese evolucionista (ver adiante), todas as explicações não-darwinistas foram tão completamente refutadas que a teoria da seleção natural de Darwin sobrou como única candidata séria.

Teorias concorrentes sobre a mudança evolutiva

As três grandes teorias não-darwinistas ou antidarwinistas são o saltacionismo, as teorias teleológicas e as teorias lamarckistas.

O saltacionismo — consequência do pensamento tipológico que dominava no período pré-darwinista — era defendido, entre os contemporâneos de Darwin, por T. H. Huxley e Kölliker. Posteriormente, também foi apoiado pelos mendelianos (Bateson, DeVries, Johannsen) e por outros poucos cientistas (Goldschmidt, Willis, Schindewolf) no período da síntese evolucionista. Ele foi por fim abandonado quando o pensamento populacional foi mais amplamente adotado, sem que nenhuma evidência de tal processo de especiação pudesse ser encontrada. Uma origem saltacional de novas espécies ocorre em organismos que se reproduzem sexualmente apenas através de poliploidia ou outras formas de rearranjo cromossômico, e essas são formas de especiação relativamente raras.

As teorias teleológicas alegam que há um princípio intrínseco na natureza que leva todas as linhagens evolutivas a uma perfeição cada vez maior. As assim chamadas teorias ortogenéticas, como a nomogênese de Berg, a aristogênese de Osborn e o princípio do ômega de Teilhard de Chardin são exemplos de teorias teleológicas. Elas acabaram perdendo todos os seus defensores quando a aleatoriedade da mudança evolutiva (inclusive muitas reversões) foi demonstrada e quando nenhum mecanismo capaz de produzir mudanças progressivas consistentes foi encontrado.

De acordo com o lamarckismo e o neolamarckismo, os organismos se transformam lentamente durante a evolução por uma herança de caracteres adquiridos. Acreditava-se que essas novas características se devessem aos efeitos do uso e desuso ou, mais diretamente, que fossem induzidas por forças do ambiente. Uma vez que o lamarckismo explicou a mudança gradual muito melhor que o saltacionismo dos mendelianos, ele se tornou bastante popular antes

da síntese evolucionista. Com efeito, até a década de 1930, havia provavelmente mais lamarckistas do que darwinistas.

As teorias lamarckistas perderam sua popularidade quando os geneticistas demonstraram que a herança dos caracteres adquiridos (ou “herança branda”) não pode ocorrer, porque caracteres recém-adquiridos do fenótipo não podem ser transmitidos à geração seguinte. A derrocada final da teoria da herança branda no século xx se deveu à descoberta da biologia molecular de que a informação contida nas proteínas (o fenótipo) não pode ser passada aos ácidos nucléicos (o genótipo). O assim chamado dogma central da biologia molecular eliminou todos os resquícios de credibilidade do lamarckismo. Há uma possibilidade de que alguns microrganismos (talvez os protistas) tenham a capacidade de sofrer mutações em resposta a condições externas, mas, mesmo que isso venha a ser confirmado, não poderá nunca valer para os organismos complexos, nos quais o DNA do genótipo é demasiado afastado do fenótipo.

Seleção natural

A seleção natural darwinista é hoje quase universalmente aceita pelos biólogos como o mecanismo responsável pela mudança evolutiva. Ela pode ser mais bem compreendida como um processo que acontece em duas etapas: variação e seleção propriamente dita.

A primeira etapa é a produção de uma variação genética maciça a cada geração devido à recombinação genética, ao fluxo genético, a fatores casuais e a mutações. A variação era claramente o ponto fraco do raciocínio de Darwin. Apesar de ter estudado e conjecturado muito, nunca chegou a entender qual era a fonte da variação. Ele claramente tinha algumas idéias erradas sobre a natureza da variação, erros estes subseqüentemente corrigidos por Weismann e pela genética pós-1900. Hoje sabemos que a variação genética é “dura” e não “branda” como imaginou Darwin. Sabemos também

que a herança mendeliana é particulada — ou seja, que as contribuições genéticas de ambos os pais não se misturam quando o óvulo é fertilizado, mas permanecem discretas e constantes. Finalmente, sabemos desde 1944 que o material genético (composto de ácidos nucléicos) não se converte diretamente no fenótipo, apenas consiste na informação genética (a “planta” ou o programa) que é traduzida em proteínas e outras moléculas do fenótipo.

A produção da variação é um processo complexo. Os ácidos nucléicos podem sofrer mutações (mudanças na seqüência de seus pares de bases), e o fazem copiosamente. Além disso, durante a formação dos gametas (meiose) nos organismos com reprodução sexuada, acontece um processo no qual os cromossomos dos pais são quebrados e reorganizados. A enorme quantidade de recombinação genética nos genótipos parentais garante que cada filho seja único. Durante o processo de recombinação, assim como nas mutações, reina o acaso. Há toda uma série de etapas consecutivas durante a meiose nas quais o arranjo dos genes é em grande parte aleatório, fazendo com que a sorte dê uma grande contribuição para o processo da seleção natural.

O segundo passo da seleção natural é a seleção propriamente dita. Isso significa que as taxas de sobrevivência e reprodução dos indivíduos recém-formados (zigotos) serão diferentes. A cada geração, apenas uma porcentagem muito pequena dos indivíduos na maioria das espécies sobreviverá, e alguns indivíduos, devido à sua constituição genética, terão maior probabilidade de sobreviver e de se reproduzir do que outros naquele ambiente específico. Mesmo no caso de espécies nas quais os dois pais produzem milhões de crias durante sua vida fértil, como as ostras e outros organismos marinhos, somente dois deles, na média, são necessários para manter a população em sua freqüência vegetativa; ainda que fatores casuais dêem uma grande contribuição à sobrevivência desses poucos progenitores na próxima geração, é inquestionável que, com o tempo,

sejam as suas propriedades genéticas os principais fatores de sobrevivência. Dessa forma, a adaptação da população é mantida geração após geração, e a população é capacitada a lidar com mudanças ambientais porque alguns genótipos são favorecidos em meio a uma prole altamente variada do ponto de vista genético.

Acaso ou necessidade?

Desde os gregos até o século XIX, reinou uma grande controvérsia sobre se as mudanças que acontecem no mundo se devem ao acaso ou à necessidade. Foi Darwin quem descobriu uma solução brilhante para essa questão capciosa: elas se devem a ambos. Na produção da variação o acaso domina, enquanto a seleção propriamente dita opera guiada em grande parte pela necessidade. No entanto, a escolha por Darwin do termo “seleção” foi infeliz, por sugerir que há algum agente na natureza que deliberadamente seleciona. Na verdade, os indivíduos “selecionados” são simplesmente aqueles que continuam vivos depois que todos os indivíduos menos adaptados ou com menos sorte foram eliminados da população. Por isso, chegou-se a sugerir que o termo seleção fosse substituído por “eliminação não-randômica”. Até as pessoas que continuam usando a palavra seleção, presumivelmente a maioria dos evolucionistas, deveriam ter sempre em mente que o que ela significa de fato é eliminação não-randômica, e que não existe uma força seletiva na natureza. Usamos esse termo simplesmente para designar o conjunto de circunstâncias adversas responsáveis pela eliminação de alguns indivíduos. E, claro, essa “força seletiva” é um mosaico de fatores ambientais e propensões fenotípicas. Os darwinistas se fiam nisso, mas seus adversários geralmente atacam uma interpretação literal desses termos.

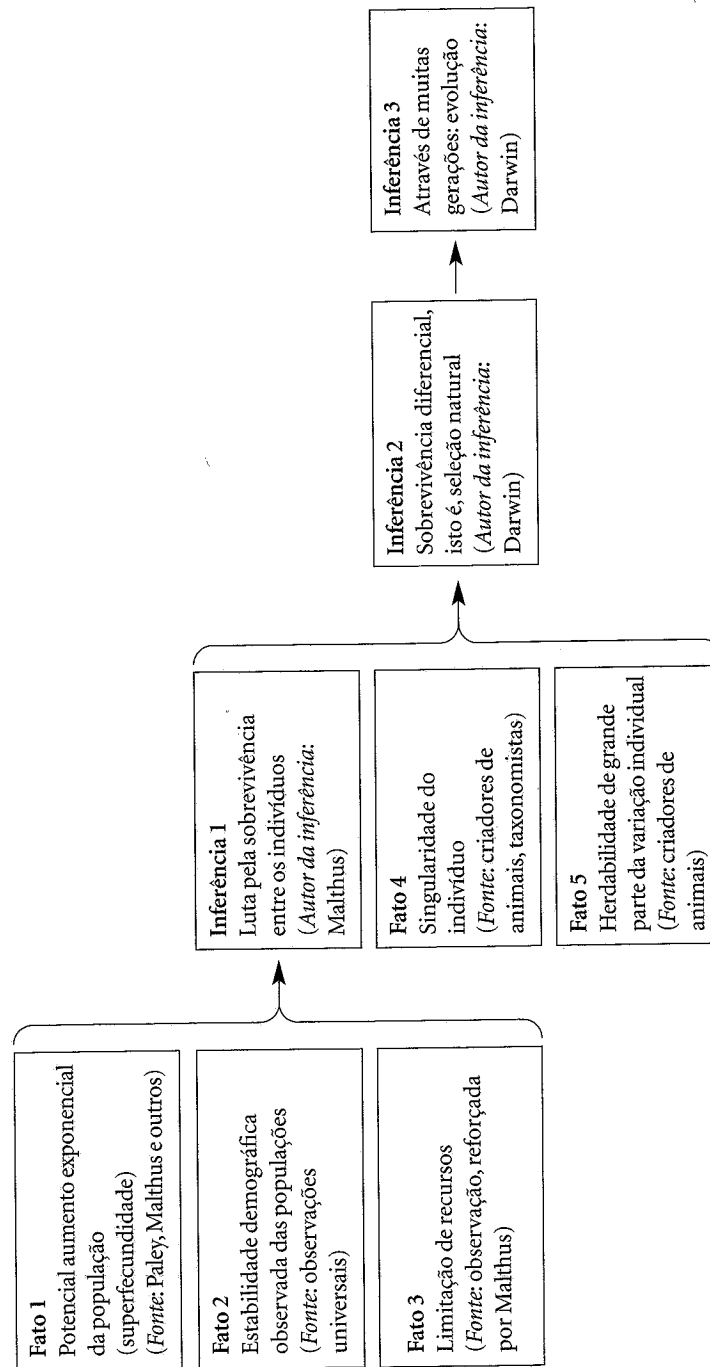
Apenas nos últimos anos os evolucionistas vieram a entender por completo quão drasticamente a teoria da evolução pela seleção natural de Darwin difere das teorias essencialistas ou teleológicas que

a precederam. Quando Darwin publicou a *Origem*, ele não tinha nenhuma prova da existência da seleção natural; ele a postulou apenas por inferência. A teoria de Darwin era baseada em cinco fatos e três inferências (ver o diagrama). Os primeiros três fatos são o aumento potencialmente exponencial das populações, a estabilidade vegetativa das populações e a limitação dos recursos. Disso resulta a inferência de que deve haver algum tipo de competição (a luta pela sobrevivência) entre os indivíduos. Dois outros fatos, a disparidade genética de cada indivíduo e a herdabilidade de grande parte da variação individual, levam à segunda inferência, a sobrevivência diferencial (ou seja, a seleção natural), e à terceira, de que a continuação desse processo por muitas gerações conduziria à evolução.

Darwin ficou encantado quando Bates (1862) demonstrou a similaridade de aparência e a variação geográfica paralela de borboletas palatáveis e das borboletas tóxicas, ou pelo menos não-comestíveis, que elas imitavam. Esse mimetismo batesiano foi a primeira prova clara da seleção natural. Hoje há centenas, se não milhares, de provas bem estabelecidas, incluindo exemplos bem conhecidos como a resistência de pragas agrícolas a inseticidas, resistência de bactérias a antibióticos, melanismo industrial, a atenuação do vírus da mixomatose na Austrália, o gene da anemia falciforme e outros genes sanguíneos e a sua relação com a malária, para citar apenas alguns poucos casos mais espetaculares.

O princípio da seleção natural é tão lógico e tão óbvio que hoje praticamente não pode ser questionado. O que pode e deve ser testado em cada caso individual é até que ponto a seleção natural contribuiu para as características de determinado componente do fenótipo. Para cada característica, as perguntas que precisam ser feitas são: A emergência evolutiva dessa característica foi favorecida pela seleção natural? Qual é o seu valor para a sobrevivência, que a levou a ser favorecida pela seleção? Esse é o chamado programa adaptacionista.

Modelo explicativo de Darwin para a evolução pela seleção natural



Seleção sexual

Características que favoreçam a sobrevivência incluem uma tolerância maior a condições climáticas adversas (frio, calor, seca), um uso melhor de recursos alimentares, uma capacidade competitiva maior, uma maior resistência a patógenos e a habilidade de escapar de inimigos. No entanto, a sobrevivência por si só não assegura a contribuição genética de um indivíduo para a geração seguinte. Do ponto de vista evolutivo, um indivíduo pode ser mais bem-sucedido não por ter atributos de sobrevivência superiores, mas simplesmente por ser mais prolífico. Darwin chamou de “seleção sexual” o processo por meio do qual os indivíduos são favorecidos pelos seus atributos reprodutivos.

Ele se impressionava especialmente com os caracteres sexuais secundários dos machos, como as lindas plumas das aves-do-paraíso, a cauda do pavão e os imponentes chifres dos cervos. Hoje sabemos que a capacidade das fêmeas de escolher seu parceiro com base nessas características (um processo chamado de escolha da fêmea) é um componente importante da seleção sexual, possivelmente mais importante que a capacidade dos machos de competir com rivais pelo acesso às fêmeas. A seleção sexual e a seleção natural não são necessariamente independentes por completo se, como parece ser o caso, as fêmeas puderem às vezes selecionar os machos que darão uma contribuição genética superior à capacidade de sobrevivência da prole.

Além disso, há outros fenômenos que acontecem durante a história de vida dos indivíduos, como a rivalidade entre irmãos e o investimento parental, que podem ter mais impacto no sucesso reprodutivo do que na sobrevivência. A seleção para o sucesso reprodutivo, portanto, é aparentemente uma categoria mais ampla do que sugere o termo seleção sexual. Muito daquilo que

os sociobiólogos estudam consiste em aspectos da seleção para o sucesso reprodutivo.³

A SÍNTESE EVOLUCIONISTA E ALÉM

Depois que Darwin publicou a *Origem*, uma controvérsia que se arrastou por oitenta anos surgiu entre darwinistas e não-darwinistas. Alguém poderia pensar que a redescoberta das leis da genética de Mendel, em 1900, traria o consenso, devido ao seu potencial de iluminar a questão da variação, mas na verdade ela só agravou a discórdia. Os primeiros mendelianos (Bateson, DeVries e Johannsen) eram incapazes de pensar populacionalmente, e rejeitaram a evolução gradual e a seleção natural. Os naturalistas e morfólogos que se opuseram a eles não eram melhores. Eles aceitavam a herança por mistura em vez da herança particulada que Mendel demonstrara, e vacilavam entre a seleção natural e a herança dos caracteres adquiridos. No começo da década de 1930, vários observadores concluíram que não havia esperança alguma de consenso em um futuro próximo.

No entanto, os alicerces de um consenso haviam sido lançados. Tanto os geneticistas quanto os naturalistas separadamente haviam feito avançar nosso conhecimento sobre a origem da adaptação e da biodiversidade, embora nenhum dos campos estivesse muito a par dos progressos do outro. Com efeito, ambos tinham idéias bastante errôneas a respeito da outra metade da biologia evolutiva. Uma ponte se fazia necessária, e em 1937 ela foi erguida, com a publicação de *Genetics and the origin of species*, de Theodosius Dobzhansky. Dobzhansky era tanto naturalista quanto geneticista. Durante sua juventude, na Rússia, ele fora um taxonomista de besouros, tinha se familiarizado com a rica literatura produzida no continente sobre as espécies e a especiação e absorvido comple-

tamente o pensamento populacional. Depois de 1927, quando se mudou para os Estados Unidos para trabalhar no laboratório de T. H. Morgan, ele tomou contato com os feitos e o pensamento dos geneticistas. Como resultado, conseguiu em seu livro fazer justiça aos dois grandes ramos da biologia evolutiva: a manutenção (ou aperfeiçoamento) da adaptação através da troca de genes no *pool* genético e as mudanças populacionais que levam à nova biodiversidade, particularmente a novas espécies. Os detalhes no esboço de Dobzhansky foram preenchidos por Mayr (espécies e especiação, 1942), Simpson (táxons superiores, macroevolução, 1944), Huxley (1942), Rensch (1947) e Stebbins (plantas, 1950). Simultaneamente, houve uma síntese paralela na Alemanha, liderada por Timofeef-Ressovsky, aluno de Chetverikov.

Até a síntese evolucionista, o estudo da macroevolução — a evolução acima do nível de espécie — estava basicamente nas mãos dos paleontólogos, que não tinham nenhuma conexão efetiva com a genética ou com os estudos de especiação. Quase nenhum paleontólogo era um darwiniano estrito; a maioria deles acreditava ou no saltacionismo ou em alguma outra forma de autogênese finalista. Eles geralmente consideravam os processos e as causações macroevolutivas como de um tipo especial, bem diferente dos fenômenos populacionais estudados pelos geneticistas e pelos estudiosos da especiação. Isso parecia ser confirmado pela prevalência de descontinuidades entre os táxons superiores — dados que pareciam estar em conflito total com o princípio do gradualismo de Darwin. Tudo na macroevolução parecia diferente do que se observava na microevolução.

A maioria dos estudiosos da microevolução ainda estava pensando em termos de evolução transformacional, ou seja, uma mudança gradual nas linhagens evolutivas na direção de uma maior especialização ou de um grau maior de adaptação. No entanto, eles foram confrontados pelo dilema darwinista de que o registro fóssil

não dava o menor apoio a esse conceito. Ao contrário, mudanças longas, contínuas e graduais nas linhagens filéticas eram raras, se é que existiam. Em vez disso, novas espécies e tipos superiores invariavelmente apareciam no registro fóssil muito de repente, e a maioria das linhagens se extinguiu mais cedo ou mais tarde. É claro, poder-se-ia invocar a incompletude do registro fóssil, mas, uma vez que isso soava mais como varrer uma objeção válida para debaixo do tapete, muitos paleontólogos adotaram o saltacionismo e ficaram gratos quando geneticistas como DeVries e Goldschmidt postularam a evolução por macromutações (“monstros promissores”).

Simpson (1944: 206) tentou outra solução, que chamou de evolução quântica, “a mudança relativamente rápida de uma população biótica em desequilíbrio para um equilíbrio marcadamente distinto da condição ancestral”. Ele pensou que isso explicaria a observação conhecida de que “grandes transições acontecem a taxas relativamente altas em períodos curtos de tempo e sob circunstâncias especiais”. É evidente nesses escritos que Simpson tinha em mente uma grande aceleração da mudança evolutiva dentro de uma linhagem filética. Esse tipo de solução se fazia necessário para ele devido a seu conceito de espécie estritamente filético. A evolução quântica foi criticada, sendo considerada um retorno ao saltacionismo, e Simpson acabou por praticamente abandoná-la mais tarde (1953).

Explicando a macroevolução

Com a refutação, pela síntese evolucionista, do saltacionismo, das teorias autogenéticas e da herança branda, era cada vez mais necessário explicar a macroevolução como um fenômeno populacional, ou seja, um fenômeno que pudesse ser derivado diretamente de eventos e processos que ocorrem durante a microevolução.⁴ Isso era especialmente verdade no caso das apa-

rentes saltações encontradas no registro fóssil. Os paleontólogos não tinham nem a informação nem o equipamento conceitual necessários à resolução desse problema.

Em 1954 propôs uma solução: que o rearranjo genético acontece em populações fundadoras durante um processo de especiação, e que as lacunas no registro fóssil se devem ao fato de que populações fundadoras em processo de especiação, muito restritas no tempo e no espaço, não tendem a ser encontradas no registro fóssil. E, no entanto, são precisamente as populações em processo de especiação isoladas na periferia as que deveriam merecer o maior interesse dos estudiosos das grandes mudanças evolutivas.

Parecia-me que vários fenômenos intrigantes, em especial aqueles que interessam aos paleontólogos, ficavam elucidados ao considerar essas populações fundadoras perdidas — incluindo taxas evolutivas desiguais (e as particularmente rápidas), as quebras nas seqüências evolutivas e as aparentes saltações, e, finalmente, a origem de novos “tipos”. A reorganização genética de populações periféricamente isoladas permite mudanças evolutivas que são muitas vezes mais rápidas que as mudanças internas nas populações que integram um sistema contínuo. Aqui, portanto, está um mecanismo que permitiria a emergência de novidades evolutivas sem nenhum conflito com os fatos observados da genética.⁵

Essa sugestão foi captada em 1971 por Eldredge e em 1972 por Eldredge e Gould, que deram o nome de “equilíbrio pontuado” a esse tipo de evolução especiativa. Eles concluíram, além disso, que, se uma nova espécie originada por esse processo fosse bem-sucedida, ela poderia entrar então em um período de estase e permanecer virtualmente sem mudanças por milhões de anos, até finalmente se extinguir. Assim, a macroevolução não é uma forma de evolução transformacional, e sim um tipo de evolução darwinista variacional, tanto quanto a evolução dentro de uma espécie. Há uma produção contínua de novas populações, a maior parte das

quais acaba se extinguindo cedo ou tarde. Uma certa porcentagem chega ao nível de espécie, na maioria das vezes sem adquirir nenhuma inovação evolutiva notável, mas também estas acabam por se extinguir. Só muito raramente é que uma nova espécie adquire, durante o período de reestruturação genética e o período subsequente de forte seleção natural, um genótipo que permite que essa neo-espécie prospere, se espalhe e se torne um novo componente do registro fóssil.

O artigo científico de Eldredge e Gould finalmente tornou os paleontólogos familiarizados com o fenômeno da evolução especiativa e os fez começar a entender por que há tantas lacunas no registro fóssil. Mas talvez a maior contribuição da teoria do equilíbrio pontuado tenha sido chamar a atenção para a frequência da estase. O esforço de alguns geneticistas para explicá-la como resultado de seleção normalizadora, é claro, não é uma explicação. Ainda assim, algumas dessas populações e espécies evoluem rapidamente apesar da seleção normalizadora, enquanto outras permanecem fenotipicamente inalteradas por muitos milhões de anos. Somos forçados a assumir que fenótipos tão estáveis são o produto de um genótipo particularmente equilibrado e internamente coeso.

Há, com efeito, muitos fenômenos na história da vida que sugerem a existência de tal coesão interna. De que outra forma seria possível explicar a virtual explosão de tipos estruturais no final do Pré-Cambriano e no começo do Cambriano? Até no incrivelmente incompleto registro fóssil é possível distinguir, durante essa época, de sessenta a oitenta morfotipos diferentes, em comparação com os cerca de trinta filos animais existentes hoje. É como se o genótipo do então novo reino animal fosse no princípio flexível o bastante para produzir, dir-se-ia experimentalmente, um grande número de novos tipos, alguns dos quais não foram bem-sucedidos e se extinguiram, ao passo que os remanescentes, representados hoje pelos modernos cordados, equinodermos, artrópodes e assim por diante,

se tornaram cada vez mais inflexíveis. Desde o começo do Paleozóico não há produção de nenhum grande novo bauplan. Parece que os existentes “congelaram”, ou seja, adquiriram uma coesão interna tão grande que não podiam mais fazer experimentos com a produção de tipos estruturais inteiramente novos.

No começo da história da genética, os estudiosos se deram conta de que a maioria dos genes é pleiotrópica, ou seja, eles têm efeitos sobre vários aspectos diferentes do fenótipo. Da mesma forma, descobriu-se que os componentes do fenótipo são, em sua maioria, caracteres poligênicos, quer dizer, são afetados por múltiplos genes. Essas interações entre genes são decisivas para a aptidão dos indivíduos e para os efeitos da seleção, mas são difíceis de analisar. A maioria dos geneticistas de populações ainda se limita ao estudo de fenômenos genéticos aditivos e à análise de *loci* de gene único. Isso é compreensível, porque o estudo de fenômenos como a estase evolutiva e a constância dos tipos estruturais são refratários demais à análise genética. Entender melhor a coesão do genótipo e seu papel na evolução é talvez o maior desafio da biologia evolutiva.

EXISTE PROGRESSO EVOLUTIVO?

A maioria dos darwinistas tem percebido um elemento progressivo na história da vida na Terra, refletido por exemplo no progresso dos procariontes, que dominaram o mundo vivo por mais de 2 bilhões de anos, até os eucariontes, com seu núcleo bem organizado, seus cromossomos e suas organelas citoplasmáticas; dos eucariontes de uma célula só (protistas) até as plantas e animais com uma divisão estrita de trabalho entre seus sistemas de órgãos altamente especializados; dentro dos animais, dos exotérmicos, que vivem à mercê do clima, aos endotérmicos, de sangue quente; e, dentro dos endotérmicos, dos tipos com cérebro pequeno e

baixa organização social àqueles com um sistema nervoso central muito grande, cuidado parental altamente desenvolvido e capacidade de transmitir informação de uma geração à outra.

É legítimo chamar essas mudanças na história da vida de progresso? Isso depende do conceito e da definição que se tem de progresso. No entanto, tal mudança é virtualmente uma necessidade dentro do conceito de seleção natural, porque as forças combinadas da competição e da seleção natural deixam poucas alternativas além da extinção ou da progressão evolutiva.

Essa mudança na história da vida é análoga a certas mudanças no desenvolvimento industrial. Por que os automóveis modernos são tão melhores que os de 75 anos atrás? Isso não se deve a uma propensão inerente dos carros a melhorar, e sim ao fato de os fabricantes ficarem o tempo todo testando inovações, enquanto a competição, que se manifesta por meio da demanda do consumidor, levou a uma enorme pressão seletiva. Nem na indústria automobilística nem no mundo vivo encontramos forças finalistas ou determinismo mecanicista. O progresso evolutivo é simplesmente o resultado inevitável do simples princípio darwinista da variação e seleção. Ele carece do componente ideológico encontrado no progressismo dos teleologistas (como Spencer) e na ortogênese.

É curioso como muitas pessoas parecem ter dificuldade para entender um caminho puramente mecanicista rumo ao progresso como o representado pela evolução darwinista, na qual os desdobramentos são diferentes em cada linhagem filética. Algumas linhagens, como os procariontes, praticamente não mudaram em bilhões de anos. Outras se tornaram altamente especializadas sem dar nenhum sinal de estar progredindo, e outras ainda, como a maioria dos parasitas e dos habitantes de nichos especiais, parecem ter passado por uma involução. Não há simplesmente nenhuma indicação, na história da vida, de uma tendência universal ou capacidade de progresso evolutivo. O aparente progresso,

onde ele é encontrado, é simplesmente um subproduto de mudanças provocadas pela seleção natural.

Por que os organismos não são perfeitos

Se a seleção natural não produz necessariamente o progresso evolutivo, ela tampouco produz perfeição, como ressaltou Darwin. Os limites à eficácia da seleção natural são mais claramente revelados pela universalidade da extinção: 99,9% de todas as linhagens evolutivas que já existiram sobre a Terra se extinguíram. As extinções em massa nos obrigam a lembrar que a evolução não é, como conceberam os teóricos da evolução transformacional, um caminho constante rumo a uma perfeição cada vez maior, e sim um processo imprevisível no qual “o melhor” pode ser exterminado de repente por uma catástrofe, e a continuidade evolutiva, assumida por linhagens filéticas que antes da catástrofe pareciam não ter nem algo que as distinguisse nem futuro algum.

Embora, como Darwin notou, a seleção natural esteja “escrutinando dia e noite, no mundo todo, cada variação, mesmo a mais sutil”, existem numerosos limites ao seu poder de operar mudanças.

Primeiramente, a variação genética necessária ao aperfeiçoamento de determinada característica pode simplesmente não acontecer. Depois, durante a evolução, a adoção de uma solução dentre as diversas possíveis para uma nova oportunidade ambiental pode limitar enormemente as possibilidades de evolução subsequente, como Cuvier já havia notado. Por exemplo, quando a vantagem seletiva de ter um esqueleto se desenvolveu entre os ancestrais dos vertebrados e dos artrópodes, os ancestrais dos artrópodes tinham os pré-requisitos para desenvolver um esqueleto externo, e os dos vertebrados, para desenvolver um interno. Toda a história subsequente desses dois grandes grupos de organismos foi afetada pelos dois caminhos diferentes tomados pelos

seus ancestrais remotos. Os vertebrados puderam produzir criaturas imensas como os dinossauros, os elefantes e as baleias, enquanto o maior tamanho que os artrópodes conseguiram atingir foi o de um caranguejo grande.

Outro limite da seleção natural é a interação ontogenética. Os diferentes componentes do fenótipo não são independentes um do outro, e nenhum deles responde à seleção sem interagir com os demais. Todo o maquinário do desenvolvimento é um sistema interativo único. Isso foi percebido pelos estudiosos de morfologia ainda na época de Geoffroy St. Hilaire (1818), que expressou essa idéia na sua *Loi de balancement* [lei do equilíbrio]. Os organismos são compromissos entre demandas concorrentes. Como determinada estrutura poderá responder às forças da seleção depende em grande medida da resistência oferecida por outras estruturas, bem como por outros componentes do genótipo. Roux se referiu às interações ontogenéticas concorrentes como a luta das partes de um organismo.

A estrutura do genótipo em si impõe limites ao poder da seleção natural. A metáfora clássica do genótipo era a de um colar de contas no qual os genes estariam alinhados como pérolas. De acordo com essa visão, cada gene seria mais ou menos independente dos outros. Pouca coisa restou dessa imagem, antes amplamente aceita. Hoje se sabe que há diferentes classes funcionais de genes, alguns encarregados de produzir material, outros de regular essa produção e outros, ainda, parecem não ter função nenhuma. Há genes codificantes únicos, DNA medianamente repetitivo, DNA altamente repetitivo, transposons, éxons e íntrons, e muitos tipos diferentes de DNA. Descobrir como exatamente eles interagem um com o outro e, especialmente, o que controla as interações epistáticas entre os diferentes *loci* gênicos ainda é um desafio para a genética.

Um outro limite à seleção natural é a capacidade existente de modificação não-genética. Quanto mais plástico é o fenótipo

(devido à flexibilidade do desenvolvimento), mais ele reduz a força de pressões seletivas adversas. As plantas e os microrganismos em particular têm uma capacidade muito maior de modificação fenotípica (uma norma de reação mais ampla) do que os animais. A seleção natural, é claro, está implicada até nesse fenômeno, uma vez que a capacidade de adaptação não-genética está sob estrito controle genético. Quando uma população se desloca para um novo ambiente especializado, são selecionados genes nas gerações seguintes que reforçam a capacidade de adaptação não-genética e podem eventualmente substituir parte dela.

Finalmente, boa parte da sobrevivência e reprodução diferencial em uma população é produto do acaso, e isso também limita o poder da seleção natural. O acaso opera em todos os níveis do processo reprodutivo, a começar do *crossing-over* entre os cromossomos parentais durante a meiose até a sobrevivência dos zigotos recém-formados. Além disso, combinações de genes potencialmente favoráveis muitas vezes são destruídas por forças ambientais indiscriminadas, como erupções vulcânicas, tempestades, enchentes ou terremotos, sem que a seleção natural tenha a oportunidade de favorecer esses genótipos. Ainda assim, com o tempo, a aptidão sempre tem um papel importante na sobrevivência desses poucos indivíduos que se tornam os progenitores das gerações subseqüentes.

CONTROVÉRSIAS ATUAIS

A síntese evolucionista confirmou o princípio básico darwinista de que a evolução se deve à variação genética e à seleção natural. No entanto, no bojo desse arcabouço darwinista básico ainda há espaço para considerável desacordo.

Durante muitos anos se arrastou uma controvérsia a respeito de qual seria a "unidade de seleção". Aqueles que primeiro adota-

ram o termo “unidade” nunca explicaram exatamente por que o fizeram; na física e na tecnologia, uma unidade específica a quantificação de uma força. O termo unidade na teoria da seleção tem um significado muito diferente, e, o que é pior, é usado na maioria das discussões para fazer referência a dois fenômenos muito distintos. Eles são a “seleção de”, no sentido de gene, indivíduo ou grupo que seja o alvo da seleção, e “seleção para”, no sentido de uma característica ou propriedade especial, como pêlo espesso, favorecida pela seleção (e algumas vezes conferida por um único gene).

O termo unidade é impróprio quando a questão é se o gene, o indivíduo, a espécie ou o que quer que seja é o alvo da seleção. Para a maioria dos propósitos do evolucionista que quer indicar o que é selecionado (gene, indivíduo, espécie), o termo “alvo” é inquestionavelmente mais adequado. No entanto, nem mesmo essa palavra inclui tudo o que o termo “unidade de seleção” supostamente abarcaria. Esta é claramente uma área que precisa de maior clareza conceitual e precisão terminológica.

A maior parte dos geneticistas, para a conveniência dos seus cálculos, tem considerado o gene o alvo da seleção. Eles tendem a enxergar a evolução como uma mudança nas frequências gênicas. Os naturalistas continuam a insistir firmemente que é o indivíduo como um todo o principal alvo da seleção, e que a evolução deveria ser considerada como os processos gêmeos de mudança adaptativa e origem da diversidade. Uma vez que o gene não é diretamente exposto à seleção natural, mas o é apenas no contexto do seu genótipo inteiro, e uma vez que o gene pode ter diferentes valores seletivos em diferentes genótipos, ele parece ser altamente inadequado como alvo de seleção.

Os proponentes da “evolução neutra” estão entre os apoiadores mais fortes do gene enquanto alvo de seleção. O estudo das alozimas pelo método da eletroforese, nos anos 1960, revelou um grau de variabilidade genética muito maior do que qualquer um

havia suspeitado. Kimura, bem como King e Jukes, concluiu desse fato e de muitas outras observações que boa parte da variação genética deveria ser “neutra”. Isso significa que o alelo recém-mutado não altera o valor seletivo do fenótipo. Há uma discussão considerável sobre se a frequência de novas mutações é mesmo tão grande quando alegou Kimura (1983). Muito mais controversa, no entanto, é a significância evolutiva da substituição do alelo neutro. Os neutralistas, considerando o gene o alvo da seleção, vêem a evolução neutra como um fenômeno altamente importante. Os naturalistas, no entanto, insistem em que, com o indivíduo como um todo sendo o alvo da seleção, a evolução só acontece se as propriedades do indivíduo mudarem. Uma substituição de genes neutros é considerada por eles apenas um “ruído” evolutivo, irrelevante para a evolução fenotípica. Se um indivíduo é favorecido pela seleção natural pelas qualidades de seu genótipo, é irrelevante saber quantos genes neutros ele pode carregar como “caronas”. Para os naturalistas, a chamada evolução neutra não está em conflito com a teoria darwinista.

Seleção de grupo

Tem havido uma incerteza considerável na literatura recente sobre se, além dos indivíduos, populações inteiras e mesmo espécies também poderiam ser alvos de seleção. Muito dessa controvérsia aconteceu sob o título de “seleção de grupo”. A questão era se um grupo como um todo poderia ser alvo de seleção, independentemente dos valores seletivos dos indivíduos que o compunham. Para abordar adequadamente essa questão, é preciso fazer uma distinção entre seleção de grupo branda e dura.

A seleção de grupo branda ocorre quando determinado grupo tem maior (ou menor) sucesso reprodutivo que outros grupos apenas porque esse sucesso se deve inteiramente ao valor sele-

tivo mais alto dos indivíduos que o compõem. Uma vez que todo indivíduo em espécies com reprodução sexuada pertence a uma comunidade reprodutiva, segue-se que todo caso de seleção individual também é um caso de seleção de grupo branda, e não se ganha nada ao preferir o termo “seleção de grupo branda” ao termo tradicional e mais claro “seleção individual”.

A seleção de grupo dura ocorre quando o grupo como um todo tem certas características adaptativas de grupo que não são simplesmente a soma das aptidões de seus membros individuais. A vantagem seletiva de um grupo desses é maior do que a média aritmética dos valores seletivos dos membros individuais. Tal seleção de grupo dura acontece somente quando há uma facilitação social entre os membros do grupo ou, como no caso da espécie humana, o grupo tem uma cultura que acrescenta ou subtrai ao valor adaptativo médio dos membros do grupo cultural. Em animais, a seleção de grupo branda é encontrada quando há divisão de trabalho ou cooperação mútua entre seus membros. Por exemplo, um grupo que tem sentinelas que avisam quando um predador está por perto pode aumentar a sua sobrevivência ao cooperar na busca de comida, na procura de lugares seguros para se empoleirar ou em outros aspectos cooperativos da vida em comunidade. Em tais casos de seleção de grupo dura, a aplicação do termo seleção de grupo é justificada.

A controvérsia também girou em torno do status da chamada seleção de espécie. Muito frequentemente, o surgimento de uma nova espécie parece contribuir para a extinção de uma outra espécie. O sucesso de novas espécies foi chamado de seleção de espécie. Há alguma justificativa para esse termo, já que, do ponto de vista do sucesso, a nova espécie parece ter uma capacidade de sobrevivência superior à da velha. No entanto, uma vez que o mecanismo pelo qual a substituição de espécies se dá é a seleção individual, seria menos confuso evitar o uso dual do termo seleção. Por essa

razão, prefiro o termo troca de espécie ou substituição de espécie. Independentemente de que termo se usa, não há dúvida de que esse é um aspecto conspícuo da mudança evolutiva, que é especialmente importante para a macroevolução. Ele acontece sob princípios darwinistas estritos.

Sociobiologia

A publicação, em 1975, de *Sociobiology: The new synthesis*, de E. O. Wilson, criou uma controvérsia acalorada em torno da questão do papel que a evolução desempenhava no comportamento social. Wilson, um dos mais proeminentes estudiosos do comportamento dos insetos sociais, chegou à conclusão de que o comportamento social merecia muito mais atenção do que havia recebido até então e que, com efeito, seu estudo merecia ser objeto de uma disciplina biológica especial, que ele chamou de sociobiologia. Ele a definiu “como o estudo sistemático da base biológica de todo comportamento social”. Ruse, em seu livro *Sociobiologia: Senso ou contra-senso?* (1979), definiu-a como “o estudo da natureza biológica e das fundações do comportamento animal, mais precisamente, do comportamento social animal”.

O trabalho de Wilson se tornou controverso por duas razões. Primeiro, ele incluiu o comportamento humano no seu tratamento e frequentemente aplicou as descobertas que fez em animais à espécie humana. A outra razão foi que tanto ele quanto Ruse usaram a frase “base biológica” de maneira algo equivocada. Para Wilson, uma base biológica para um comportamento significava que uma predisposição genética contribuía para o fenótipo comportamental. Para seus oponentes politicamente motivados, no entanto, uma base biológica significava “geneticamente determinada”. É claro que nós, humanos, seríamos apenas autômatos genéticos se todas as nossas ações fossem exclusivamente controladas pelos nossos

genes. Todo mundo (Wilson inclusive) sabe que esse não é o caso, mas sabemos também, especialmente devido a estudos com gêmeos, que nosso patrimônio genético dá uma contribuição notavelmente grande às nossas atitudes, qualidades e propensões. O biólogo moderno sabe demais para querer reviver a velha polarização entre natureza e criação, porque ele sabe que quase todos os traços humanos são influenciados pela interação entre a herança genética e o ambiente cultural. O ponto mais importante destacado por Wilson foi que, em muitos aspectos, os mesmos problemas são encontrados nos estudos de comportamento humano e nos de comportamento animal. Da mesma forma, muitas das respostas que se mostraram corretas para o comportamento animal também são aplicáveis ao estudo do comportamento humano.

De acordo com as definições de sociobiologia dadas por Wilson e Ruse, poderíamos pensar que esse campo abarca todas as ações e interações sociais encontradas em animais. Isso incluiria, por exemplo, todas as migrações sociais, como as dos ungulados africanos, das aves sociais migratórias, as migrações de desova dos límulos e as de outros invertebrados e vertebrados (como as baleias-cinzentas). Esses e muitos outros fenômenos sociais, no entanto, não são abordados por Wilson e Ruse. Em vez disso, os objetos da sociobiologia, segundo Ruse, são agressão, sexo e seleção sexual, investimento parental, estratégias reprodutivas femininas, altruísmo, seleção de parentesco, manipulação parental e altruísmo recíproco.

A maioria desses fenômenos diz respeito à interação entre dois indivíduos e tangem direta ou indiretamente o sucesso reprodutivo. Todos eles representam atividades que em última análise aumentam ou reduzem a reprodução, e são, *grosso modo*, relacionados com a seleção sexual.

A sociobiologia, assim circunscrita, é obviamente um segmento muito limitado do campo do comportamento social e,

como tal, levanta todo tipo de questão. Que tipo de interação entre dois indivíduos se qualifica como comportamento social? Quando, se em algum momento, a competição por recursos constitui comportamento social? Se a rivalidade entre irmãos, que é um tipo de competição por recursos, se qualifica como comportamento social, quando a competição não é comportamento social?

A maioria dos ataques à sociobiologia se voltou contra sua aplicação ao ser humano. No livro de Ruse, o tratamento do comportamento social humano teve um espaço dois terços maior do que o dos animais. Essa é a principal razão pela qual a sociobiologia tem status controverso, e explica por que a maioria daqueles que trabalham com os problemas listados por Wilson e Ruse sob a sociobiologia não usa o termo para designar o trabalho que faz; eles não se auto-intitulam sociobiólogos.

Biologia molecular

Finalmente, nos últimos anos, muita energia se gastou discutindo até que ponto as descobertas da biologia molecular requerem uma revisão da teoria evolutiva atual. Algumas vezes se diz que os achados daquela disciplina obrigam a uma modificação na teoria darwinista. Esse não é o caso. As descobertas da biologia molecular que são relevantes para a evolução lidam com a natureza, a origem e a quantidade de variação genética. Algumas dessas descobertas, como a existência dos transpósons, são surpreendentes, mas toda a variação produzida por essas novas descobertas moleculares é em última instância exposta à seleção natural e, portanto, integra o processo darwinista.

As descobertas moleculares de maior interesse evolutivo são as seguintes: (1) O programa genético (DNA) não fornece ele próprio o material para a construção de um novo organismo, mas constitui apenas a planta (informação) para se moldar o fenótipo.

(2) A via dos ácidos nucleicos até as proteínas é de mão única. A informação que as proteínas possam ter adquirido não é traduzida de volta em ácidos nucleicos; não existe “herança branda”. (3) Não só o código genético, mas, com efeito, a maioria dos mecanismos moleculares básicos são os mesmos em todos os organismos, dos mais primitivos procariontes para cima.

Múltiplas causas, múltiplas soluções

Muitas das controvérsias que surgiram na biologia desde o tempo de Darwin devem sua resolução a duas importantes modificações na forma como os evolucionistas pensam. A primeira é o reconhecimento da importância de múltiplas causas simultâneas. Por diversas vezes, um problema evolutivo pareceu contraditório quando somente a causa próxima ou última era considerada, enquanto na verdade ele era resultado da ocorrência simultânea de ambos os tipos de causa. De forma similar, outras controvérsias surgiram e foram resolvidas quando as pessoas se deram conta de que tanto fenômenos aleatórios quanto a seleção ocorrem simultaneamente, ou que a geografia e as mudanças genéticas em uma população afetam juntas o processo de especiação.

Além de terem múltiplas causas, quase todos os desafios evolutivos têm múltiplas soluções, e o reconhecimento dessa possibilidade resolveu muitas disputas. Durante a especiação, por exemplo, mecanismos de isolamento pré-acasalamento se originam primeiro em alguns grupos, enquanto em outros grupos mecanismos pós-acasalamento surgem antes. Às vezes, as raças geográficas são fenotipicamente tão distintas quanto espécies verdadeiras, e mesmo assim não estão em isolamento reprodutivo; por outro lado, espécies fenotipicamente indistinguíveis (espécies irmãs) podem estar em completo isolamento reprodutivo. A poliploidia ou a reprodução assexuada são importantes em alguns grupos de

organismos, mas totalmente ausentes em outros. A reconstrução cromossômica parece ser um componente importante da especiação em alguns grupos de organismos, mas não ocorre em outros. Alguns grupos se especiam profusamente, ao passo que em outros a especiação parece ser um evento raro. O fluxo genético é elevado em algumas espécies e reduzido em outras. Uma linhagem filética pode evoluir muito rápido, enquanto outras proximamente aparentadas com ela podem passar por milhões de anos de estase.

Em resumo, há múltiplas soluções possíveis para muitos desafios evolutivos, embora todas elas sejam compatíveis com o paradigma darwinista. A lição que se deve tirar desse pluralismo é que, em biologia evolutiva, generalizações acachapantes raramente estão corretas. Mesmo quando uma coisa acontece “geralmente”, isso não significa que ela deva acontecer sempre.

10. Que perguntas faz a ecologia?

Dentre todas as disciplinas biológicas, a ecologia é a mais heterogênea e também a mais completa. Quase todo mundo concordaria que ela lida com as interações entre os organismos e seu ambiente vivo e não-vivo, mas essa definição é ampla demais. Qual é, então, o objeto da ecologia?¹

O termo “ecologia” foi cunhado por Haeckel em 1866, para definir “a casa da natureza”. Em 1869, ele propôs uma definição mais elaborada:

Por ecologia queremos dizer o corpo de conhecimento que diz respeito à economia da natureza — a investigação das relações totais do animal, tanto com seu ambiente orgânico quanto com o inorgânico, incluindo, acima de tudo, suas relações amigáveis ou não com os animais e plantas com os quais ele trava contato, direta ou indiretamente — em uma palavra, a ecologia é o estudo de todas as complexas inter-relações às quais Darwin se referiu como as condições para a luta pela sobrevivência.

Apesar desse batismo por Haeckel, a ecologia só veio a se tornar um campo verdadeiramente ativo de investigação por volta de 1920; a fundação de sociedades ecológicas e de periódicos profissionais dedicados à ecologia é ainda mais recente. Mas, olhando a ecologia de outro ponto de vista, ela nada mais é que uma “história natural autoconsciente”, como um ecólogo a chamou uma vez, e o interesse na história natural recua até o homem primitivo.² Qualquer coisa de que se ocupe o naturalista — história de vida, comportamento reprodutivo, parasitismo, combate a inimigos e assim por diante — é automaticamente de interesse do ecólogo.

UMA BREVE HISTÓRIA DA ECOLOGIA

Desde Aristóteles até Lineu e Buffon, a história natural foi em grande parte descritiva, mas não inteiramente. Além de suas observações, os naturalistas também fizeram comparações e sugeriram teorias explicativas que geralmente refletiam o *Zeitgeist*. A grande era da história natural foi o período que compreendeu o século XVIII e a primeira metade do XIX, e a ideologia dominante era a teologia natural.

De acordo com essa visão de mundo, tudo na natureza está em harmonia, porque Deus não permitiria que fosse diferente. A luta pela sobrevivência era benigna, programada para manter o equilíbrio da natureza. Mesmo que cada casal de pais produzisse um número excessivo de filhotes, eles eram reduzidos ao número necessário para sustentar uma população em equilíbrio demográfico. Os fatores responsáveis por essa redução nos números em cada geração consistiam em causas climáticas, predação, doenças, falha em se reproduzir com sucesso e assim por diante. A natureza, para o teólogo natural, operava como uma máquina bem programada. Em última análise, tudo podia ser atribuído à benevolência

do Criador. Essa visão de mundo é refletida nos escritos de Lineu, William Paley e William Kirby.

Gilbert White, vigário de Selborne, é talvez o naturalista mais conhecido no mundo de língua inglesa do século XVIII, mas a história natural também prosperou no resto da Europa.³ No entanto, com a derrocada da teologia natural em meados do século XIX e, de forma mais generalizada, com o cientificismo cada vez mais forte, uma história natural descritiva já não era mais adequada. A história natural precisava se tornar explanatória. Ela continuou a fazer o que fizera sempre — observar e descrever —, mas, ao aplicar outros métodos às observações (comparação, experimento, conjecturas, teste de teorias explicativas), acabou por se transformar na ecologia.

Houve duas grandes influências no desenvolvimento subsequente dessa disciplina: o fisicalismo e a evolução. O alto prestígio da física como ciência explicativa conduziu a esforços para reduzir os fenômenos ecológicos a fatores puramente físicos. Isso começou com a geografia vegetal ecológica de Alexander von Humboldt (1805), na qual a importância fundamental da temperatura era apontada como um fator que controlava a composição da vegetação tanto em termos de latitude quanto de altitude (ver abaixo). Seu trabalho pioneiro foi expandido por C. Hart Merriam (1894) em seu esforço para explicar as zonas de vegetação no monte San Francisco, no norte do Arizona, como sendo resultantes da temperatura. Os geógrafos de plantas europeus enfatizaram da mesma forma a importância dos fatores físicos, em especial a temperatura e a umidade.

A segunda maior influência sobre a ecologia foi a publicação de *A origem das espécies*. Darwin refutou completamente a teologia natural e explicou os fenômenos da natureza por meio de conceitos como competição, exclusão de nicho, predação, fecundidade, adaptação, coevolução e assim por diante. Ele simultaneamente

rejeitou a teleologia, reconhecendo a aleatoriedade do destino de populações e espécies. A natureza, na visão de Darwin e dos ecólogos modernos, é algo inteiramente diferente do mundo controlado por Deus dos teólogos naturais.

Depois de Darwin, todas as adaptações fisiológicas e comportamentais dos organismos — para seus modos especializados de vida ou para os ambientes especializados nos quais eles vivem — passaram a ser corretamente consideradas de interesse da ecologia. Algumas das perguntas básicas que os ecólogos começaram a fazer foram: Por que existem tantas espécies? Como essas espécies dividem entre si os recursos do ambiente? Por que a maioria dos ambientes é relativamente estável a maior parte do tempo? O bem-estar e a densidade populacional de uma espécie são controlados mais por fatores físicos ou por fatores bióticos — as outras espécies com as quais ela convive? Que propriedades fisiológicas, comportamentais e morfológicas permitem a uma espécie lidar com o seu ambiente?

Ecologia hoje

A ecologia moderna e suas controvérsias podem ser subdivididas em três categorias: a ecologia do indivíduo, a ecologia da espécie (autecologia e biologia de populações) e a ecologia das comunidades (sinecologia e ecologia de ecossistemas). Tradicionalmente, os zoólogos se concentraram em problemas autecológicos e os botânicos, em problemas sinecológicos. Harper (1977) foi um dos primeiros botânicos, se não o primeiro, a estudar nas plantas os mesmos problemas autecológicos de que se haviam ocupado os zoólogos. Mas mesmo hoje a ecologia de plantas ainda é, no geral, um campo bastante diferente da ecologia animal. E uma ecologia de fungos e procariontes praticamente não existe, ao menos não sob essa designação.⁴

A ECOLOGIA DO INDIVÍDUO

Durante a segunda metade do século XIX, como extensão das atividades dos naturalistas, os ecólogos investigaram as necessidades ambientais exatas dos indivíduos de uma dada espécie: sua tolerância ao clima, seu ciclo de vida, os recursos necessários e os fatores que controlam a sobrevivência (inimigos, competidores, doenças). Eles estudaram as adaptações que determinado indivíduo de uma espécie deve ter para viver com sucesso no ambiente específico da espécie. Tais adaptações incluem a hibernação, a migração, a atividade noturna e um conjunto de outros mecanismos fisiológicos e comportamentos que permitem aos organismos sobreviver e se reproduzir sob condições às vezes extremas, desde o Ártico até os desertos.⁵

Do ponto de vista da ecologia do indivíduo, o principal papel do ambiente é o de exercer uma contínua seleção estabilizadora, que elimina todos os indivíduos que transgrediram o nível ótimo de variação permissível. Isso é exatamente o que um darwinista esperaria. É o ambiente, tanto o biótico quanto o físico, que desempenha o papel fundamental na seleção natural. Cada estrutura de um organismo, cada uma de suas propriedades fisiológicas, todo o seu comportamento e, com efeito, todo e qualquer componente de seu fenótipo e genótipo evoluíram para uma relação ótima do organismo com o seu ambiente.

A ECOLOGIA DA ESPÉCIE

Depois da ecologia do indivíduo, o desdobramento seguinte foi a ecologia da espécie, também chamada de biologia de populações. A população local — a população que está em contato com as populações de outras espécies — é o objeto de interesse especial

desse ramo da ecologia. O que o ecólogo especializado em biologia de populações estuda é a densidade de uma população (o número de indivíduos por unidade de área), a taxa de aumento (ou declínio) de tal população sob condições variadas e, ao lidar com as populações de uma única espécie, todos os parâmetros que controlam o tamanho de uma população, tais como taxa de natalidade, expectativa de vida, mortalidade e assim por diante.

Esse campo remonta a uma escola de demógrafos matemáticos interessados no crescimento das populações e nos fatores que o controlam. Os nomes associados com esse movimento são R. Pearl, V. Volterra e A. J. Lotka.⁶ Muito mais importante para a prática do ecólogo foi a publicação, em 1927, de *Animal ecology*, de Charles Elton, “a sociologia e a economia dos animais”. Dessa data em diante, a biologia de populações foi claramente reconhecida como uma subdisciplina distinta da ecologia.⁷

O conceito de população adotado pela maioria dos ecólogos matemáticos era basicamente tipológico, no sentido de que ignorava a variação genética existente dentro de uma população. Suas “populações” não eram populações em nenhum sentido genético ou evolutivo, e sim aquilo que os matemáticos chamam de conjuntos. O aspecto crucial do conceito de população que emergira da biologia evolutiva, por outro lado, é a disparidade genética dos indivíduos que a compõem. Esse tipo de “pensamento populacional” contrasta agudamente com o pensamento tipológico do essencialismo. Em ecologia, a singularidade genética dos indivíduos é geralmente ignorada.

Nicho

Uma característica crucial das espécies é que cada uma ocupa uma dada subdivisão do ambiente, que fornece tudo aquilo de que ela necessita. O ecólogo chama isso de nicho da espécie. No conceito

clássico de nicho, desenvolvido por Joseph Grinnell, a natureza era visualizada de forma a consistir em numerosos nichos, cada um deles apropriado para determinada espécie. Charles Elton teve uma idéia semelhante: o nicho é uma propriedade do ambiente.

Evelyn Hutchinson introduziu um conceito diferente de nicho. Embora ele o tenha definido como um espaço multidimensional de recursos, sua escola, se entendi bem seus escritos, considerava o nicho mais ou menos como uma propriedade da espécie. Se dada espécie estava ausente de uma área, isso significava que seu nicho também estava ausente. Mas qualquer naturalista que estude determinada localidade pode descobrir nela recursos subutilizados ou nichos aparentemente vazios. Isso é bem ilustrado pela completa ausência de pica-paus nas florestas da Nova Guiné, florestas estas que em estrutura geral e em composição botânica são muito semelhantes às florestas de Bornéu e Sumatra, onde ocorrem 28 e 29 espécies de pica-paus, respectivamente. Além disso, o nicho típico dos pica-paus não parece ser preenchido na Nova Guiné por nenhuma outra espécie de ave. A mesma disposição de nichos desocupados é demonstrada em casos nos quais uma espécie invasora parece ter pouco ou nenhum impacto no tamanho das populações de membros preexistentes da comunidade “invadida”.

Quando uma das necessidades de uma espécie não é suprida adequadamente — por exemplo, quando um elemento químico está ausente do solo ou o calor é excessivo —, esse “recurso limitante” ou “fator limitante” pode impedir a existência dessa espécie naquele local. Os limites da zona de distribuição de uma espécie (quando não são determinados por barreiras geográficas) são geralmente controlados por fatores limitantes como temperatura, precipitação, química do solo e a presença de predadores. Nos continentes, como Darwin bem sabia, as fronteiras da distribuição de uma espécie frequentemente parecem se dever à competição com outra espécie.

Competição

Quando muitos indivíduos de uma mesma espécie ou de várias espécies diferentes dependem do mesmo recurso limitado, pode surgir uma situação chamada de competição. Os naturalistas havia muito conheciam a existência da competição; seus efeitos foram descritos por Darwin com um grau considerável de detalhe. A competição entre indivíduos de uma mesma espécie (competição intra-espécie), um dos mecanismos principais da seleção natural, é de interesse da biologia evolutiva. A competição entre os indivíduos de espécies diferentes (competição interespecie) é de grande interesse da ecologia. Ela é um dos fatores que controlam o tamanho de populações que competem entre si e, em casos extremos, pode levar à extinção de uma das espécies concorrentes. Isso foi descrito por Darwin na *Origem* para o caso das espécies de plantas e animais nativos da Nova Zelândia que desapareceram quando competidores europeus foram introduzidos.

Nenhuma competição séria acontece quando o recurso de que mais se necessita é superabundante, como na maioria dos casos de coexistência entre herbívoros. Além disso, a maioria das espécies não depende totalmente de um único recurso, e, se o principal deles escasseia, elas passam a usar recursos alternativos e, no caso de espécies competidoras, em geral recursos diferentes. A competição é usualmente mais acirrada entre parentes próximos com demandas ambientais parecidas, mas pode ocorrer também entre formas sem relação nenhuma entre si que competem pelo mesmo recurso, como roedores comedores de sementes e formigas. Os efeitos de tal competição são explicitamente demonstrados quando faunas e floras inteiras passam a competir, como aconteceu no final do Plioceno, quando as Américas do Norte e do Sul foram unidas pelo istmo do Panamá. A junção resultou no extermínio de grande parte da fauna de mamíferos da América do Sul,

aparentemente incapaz de suportar a competição com espécies norte-americanas invasoras, embora a predação adicional tenha sido também um fator importante.

Até que ponto a competição determina a composição de uma comunidade e a densidade de uma dada espécie é algo que tem sido objeto de controvérsia considerável. O problema é que a competição normalmente não pode ser observada diretamente, mas precisa ser inferida a partir do espalhamento ou aumento de uma espécie e da concomitante redução ou do desaparecimento de outra espécie. O biólogo russo Gause realizou vários experimentos com duas espécies no laboratório, nos quais uma delas se extinguiu quando apenas um recurso homogêneo estava disponível. Com base nesses experimentos e em observações de campo foi formulada a chamada lei da exclusão competitiva, segundo a qual duas espécies não podem ocupar o mesmo nicho. Várias exceções aparentes a essa “lei” têm sido encontradas, mas elas em geral podem ser explicadas quando se revela que as duas espécies, embora competindo por um grande recurso conjunto, não estão ocupando exatamente o mesmo nicho.

A competição entre espécies é de importância evolutiva considerável. Ela exerce uma pressão centrífuga sobre as espécies coexistentes, resultando em divergência morfológica entre espécies simpátricas, bem como na tendência que elas apresentam a expandir seus nichos para áreas sem sobreposição. Darwin se referiu a isso como princípio da divergência. Nos lugares onde a competição leva à extinção de uma espécie, ela foi chamada de “seleção de espécie”. No entanto, a substituição de uma espécie ou o retorno de espécies podem descrever melhor a situação, porque as pressões de seleção se fazem sentir sobre os indivíduos das espécies competidoras, mesmo que o bem-estar e a existência de uma espécie inteira sejam afetados. A “seleção de espécie” é na verdade o resultado de uma seleção individual.

A competição pode acontecer por qualquer recurso necessário. No caso dos animais, esse recurso geralmente é comida; no caso de plantas em uma floresta, pode ser luz; no de habitantes de substrato pode ser espaço, como no caso de vários organismos marinhos bentônicos de águas rasas. Com efeito, a competição pode acontecer por qualquer fator essencial para os organismos, seja ele físico ou biótico. A competição em geral é mais acirrada quanto mais densa for a população. Juntamente com a predação, ela é o mais importante fator dependente da densidade na regulação do crescimento de uma população.

Estratégias reprodutivas e densidade populacional

Os biólogos de populações descobriram que a maioria das espécies pode ser enquadrada em uma de duas classes no que diz respeito ao tamanho de suas populações e a suas estratégias reprodutivas. A primeira classe é de espécies com tamanho de população extremamente variável, geralmente sujeitas a catástrofes e com fraca competição intra-específica. Tais espécies tendem a ter alta fertilidade; ou seja, elas adotaram uma estratégia de seleção r [de “reprodução”]. Outras espécies têm um tamanho de população quase constante de um ano para outro, perto da capacidade de suporte do ambiente, e estão sujeitas a intensa competição intra e interespecífica. Elas tendem a ter um tempo de vida longo e são selecionadas para um desenvolvimento lento, reprodução retardada e prole única. Isso é conhecido como estratégia de seleção K [de “competição”].

Mesmo levando em conta essas diferenças de estratégia reprodutiva, a fertilidade de todas as espécies é tão grande que, se todos os filhotes de um casal se reproduzissem, o tamanho da população iria com o tempo se aproximar do infinito. Desde a Antiguidade se sabe, no entanto, que apenas uma fração da prole

de uma geração sobrevive para produzir a geração seguinte. Entre os fatores responsáveis por essa redução em cada geração estão a competição por recursos limitados, variações climáticas, predação, doenças e falha em se reproduzir com sucesso. O resultado é que as populações da maioria das espécies, apesar da variação, das flutuações e da morte contínua dos indivíduos, atingem um equilíbrio demográfico. A forma como esse equilíbrio é obtido tem sido objeto de várias controvérsias na literatura ecológica.

Os ecólogos se deram conta bem cedo (com evidências persuasivas apresentadas por David Lack) de que grande parte da mortalidade nas populações naturais é dependente da densidade. Isso significa que, à medida que a densidade da população aumenta, fatores adversos como predação, competição, doenças, escassez de recursos e falta de esconderijos têm um impacto cada vez maior e levam a uma mortalidade cada vez maior, reduzindo assim o crescimento da população. Essa descoberta levou à visão de que as populações têm um poder de auto-regulação,⁸ que se manifesta através de limites ao crescimento da população, como o estabelecimento de territórios, a redução da ninhada em aves, uma dispersão maior no caso de algumas plantas e diversos outros. No entanto, para que esse poder de auto-regulação pudesse operar, seria necessário assumir a seleção de grupo (ver o capítulo 8), um processo que desfrutou um período inicial de popularidade, mas que se demonstrou depois só ocorrer em espécies sociais. Lack, G. C. Williams e outros mostraram que a seleção natural operando nos indivíduos, juntamente com a seleção por parentesco (ver o capítulo 12), é suficiente para explicar a territorialidade, as baixas taxas reprodutivas, a dispersão e todos os outros fenômenos que já foram atribuídos à auto-regulação. A teoria da auto-regulação não é mais levada a sério.

Andrewartha e Birch alegaram uma vez que o clima tinha a capacidade de se sobrepor a todos os fatores adversos relacionados

com a densidade populacional e poderia controlar o tamanho das populações independentemente da densidade. Com efeito, todos sabem que fatores climáticos como invernos rigorosos, verões quentes, secas e precipitação excessiva podem ter um impacto catastrófico sobre as populações, principalmente as de insetos e invertebrados. Uma análise estatística sofisticada de mudanças populacionais ocorridas sem influência do fator densidade mostrou que o efeito desta é sobreposto nas flutuações de população induzidas pelo clima. O tamanho das populações é evidentemente controlado por fatores tanto físicos quanto biológicos.

Predadores, presas e coevolução

Enquanto a maioria das espécies tem tamanhos de população notavelmente parecidos ano após ano, outras são caracterizadas por uma flutuação irregular ou cíclica de suas populações. Elton (1924) mostrou que essas flutuações entre os pequenos herbívoros (camundongos, lemingues, lebres) resultavam em flutuações similares nas populações de seus predadores, como a raposa-do-ártico. Pequenos roedores do Ártico geralmente têm um ciclo de três a quatro anos, bem como seus predadores. As lebres, que são maiores, geralmente têm ciclos de nove a dez anos, e seus predadores também. Hoje sabemos que os ciclos dos herbívoros produzem os ciclos dos predadores, e não o contrário.

Em resposta à pressão dos predadores, as presas geralmente adquirem determinados comportamentos adaptativos (por exemplo, procurar e encontrar esconderijos), ou melhor proteção (carapaças mais duras, por exemplo), gosto ruim e assim por diante. Com o tempo, por sua vez, os predadores são selecionados para superar essas defesas. Isso resulta em uma “corrida armamentista” entre predador e presa. A maioria das plantas desenvolveu uma verdadeira bateria de defesas na forma de diversas substâncias

químicas, sobretudo alcalóides, que as tornam repulsivas para a maioria dos herbívoros, mas há geralmente alguns táxons de herbívoros que conseguem lidar com essas defesas químicas.

Quando uma planta desenvolve novas moléculas de defesa contra herbívoros, e os insetos, por sua vez, desenvolvem novos mecanismos de desintoxicação, dizemos que há uma “coevolução” entre as espécies que interagem. A coevolução também pode assumir a forma de mutualismos, incluindo a simbiose. Um exemplo famoso deste último é a mariposa-da-iúca, que destrói algumas das potenciais sementes da iúca em prol de suas larvas, mas que, em compensação, poliniza as flores, assegurando tanto o bem-estar da larva quanto a produção de sementes de iúca em quantidade suficiente.

Há casos nos quais os predadores, especialmente aqueles recém-introduzidos em uma área, têm efeitos devastadores sobre uma dada espécie de presa. Em alguns casos raros, um predador pode eliminar inteiramente uma espécie, como quando a mariposa-do-cacto (*Cactoblastis*) virtualmente destruiu as populações de *Opuntia* introduzidas em Queensland, Austrália. Normalmente, alguns indivíduos sobrevivem, e a população de presas se recupera depois do declínio na população de predadores. As múltiplas interações entre predadores e presas constituem uma área muito ativa de pesquisa na ecologia. Esses estudos são especialmente importantes para o controle biológico de pragas agrícolas.

A cadeia alimentar e a pirâmide numérica

Elton ressaltou que os membros de uma comunidade formam uma cadeia alimentar, cujo primeiro elo são as plantas, que fazem fotossíntese, o segundo os herbívoros, o terceiro os carnívoros e os decompositores (micróbios e fungos) o último. As plantas fotossintéticas são chamadas de organismos produtores, enquanto os outros membros da cadeia alimentar são às vezes chamados de con-

sumidores. Os carnívoros, por sua vez, podem consistir em classes de diferentes tamanhos, com os grandes carnívoros se alimentando não somente de herbívoros, mas também de outros carnívoros.

Existe, em média, um aumento no tamanho do corpo à medida que se sobe na cadeia alimentar. Entre os herbívoros há miríades de insetos (e suas larvas), enquanto os carnívoros geralmente são maiores e ocorrem em números muito menores. No entanto, exemplos como o elefante e os grandes ungulados mostram que os herbívoros também podem atingir um tamanho grande. Com efeito, alguns dos maiores herbívoros (elefantes e grandes dinossauros) são em geral maiores que os maiores carnívoros que convivem com eles.

As plantas fotossintéticas dão, de longe, a maior contribuição para a biomassa da Terra, enquanto os herbívoros contribuem bem menos e os carnívoros, menos ainda. O número de carnívoros é muito pequeno se comparado ao dos herbívoros que eles consomem, e isso leva a uma “pirâmide numérica”, que reflete o fato de que os organismos no topo da cadeia alimentar são comparativamente escassos. Um gato que se alimenta de ratos ou uma baleia que se alimenta de milhões de krill (*Euphausia*) ilustram essa redução dos números nos níveis mais altos da cadeia alimentar.

Histórias de vida e pesquisa taxonômica

Todos os estudos comparativos sobre a raridade das espécies, sobre o tamanho da zona de distribuição de uma espécie, sobre interações entre predador e presa e muitas outras áreas de pesquisa em biologia de populações dependem do conhecimento dos táxons de espécie existentes e de sua história de vida. Os naturalistas tradicionais, especialmente os botânicos e os estudiosos dos insetos e dos organismos aquáticos, também eram em sua maioria taxonomistas. Com efeito, seus estudos da história de vida dos organismos existentes hoje os ajudaram

enormemente em sua classificação taxonômica. Essa dupla competência ficou muito mais rara depois que a ecologia se emancipou da história natural, mas todos os bons taxonomistas continuaram a ser bons naturalistas.⁹

O estudo das histórias de vida dos animais e das plantas é claramente uma preocupação antiga dos ecólogos. No caso das plantas, a divisão clássica entre anuais e perenes se baseia em um critério de história de vida [ecológico], e a distribuição das plantas em categorias como ervas, arbustos e árvores também usa um critério ecológico. No caso dos animais, virtualmente todos os aspectos de sua história de vida — longevidade, fertilidade, sedentarismo, natureza do nicho, sazonalidade, frequência de reprodução, sistemas de acasalamento e assim por diante — afetam o sucesso reprodutivo e o tamanho da população e, portanto, interessam ao biólogo de populações.

No entanto, depois de centenas de anos de um trabalho dedicado por parte dos taxonomistas, ainda não temos nenhuma estimativa razoável de quantas espécies existem, muito menos um conhecimento funcional da história de vida de cada uma. Se houver 10 milhões de espécies de animais (uma estimativa muito conservadora), e se cerca de 1,5 milhão de espécies já foram descritas, isso significa que cerca de 15% das espécies são conhecidas. Se, no entanto, o número de espécies for 30 milhões (uma estimativa também legítima), apenas 5% são conhecidas.

Além do mais, o grau de conhecimento que temos sobre os diferentes grupos é muito desigual. O número de espécies de ave é de cerca de 9300 no máximo, e a maior parte dos acréscimos recentes a essa cifra resultou não de descobertas, mas da elevação de populações isoladas à categoria de espécie. O número de novas espécies de ave descobertas nos últimos dez anos é menos de 1% do total. Em outras palavras, pelo menos 99% das espécies de ave já foram descobertas e descritas. Por outro lado, em muitos grupos de insetos, arac-

nídeos e invertebrados inferiores o número de espécies conhecidas pode ser menor que 10% do de espécies existentes, e o mesmo vale para fungos, protistas e procariontes. Os estudos sobre a diversidade local de espécies são terrivelmente insuficientes para as biotas tropicais e para ambientes marinhos especiais. Esta é uma das razões pelas quais os ecólogos endossam tão fervorosamente o maior apoio à pesquisa taxonômica.

A ECOLOGIA DAS COMUNIDADES

Um tipo de ecologia totalmente diferente daquela dos indivíduos ou das populações começou a evoluir no final do século XIX, à medida que a ecologia se libertou das suas raízes, a história natural e a geografia de plantas, e se tornou uma ciência independente. A ênfase dessa nova “ecologia de comunidades” ou “sinecologia” estava na composição e na estrutura das comunidades que consistem em espécies diferentes.¹⁰

Os fundamentos dessa forma de enxergar a natureza podem ser encontrados nos escritos de Buffon. Mas o verdadeiro fundador da ecologia de comunidades foi Alexander von Humboldt, em sua análise dos tipos de vegetação — criados por climas semelhantes, independentemente dos relacionamentos taxonômicos entre as espécies que os constituem. Entre os tipos de vegetação estão os campos naturais, as florestas temperadas e decíduas, a tundra e as savanas; e, uma vez que esses eram os exemplos mais conspícuos de comunidades, a ênfase da sinecologia estava em comunidades de plantas, e essa disciplina era altamente focada na geografia.

Uma floresta tropical, seja na Austrália, seja na Amazônia, tem um aspecto característico. O mesmo vale para um deserto, não importa o continente onde ele se encontra. Taxonomicamente, como Darwin notou, as plantas de um tipo particular de

vegetação — por exemplo, os desertos — nos diferentes continentes não se relacionam especificamente umas com as outras, mas com as plantas de outros tipos de vegetação no mesmo continente. Os ecólogos de plantas, desde Humboldt, mas mais especificamente a partir da segunda metade do século XIX, tentaram caracterizar esses vários tipos de vegetação e as suas causas.

A *Ecology of plants*, de Eugene Warming (1896), foi o produto mais bem-sucedido dessa tradição, e seu autor foi chamado de pai da ecologia. Todos os membros da sua escola eram fortemente fisiologistas em suas explicações, com ênfase no papel da temperatura, da água, da luz, do nitrogênio, do fósforo, do sal e de outras substâncias e elementos químicos na distribuição dos tipos de vegetação. Mas, para Warming, diferentemente de muitos de seus predecessores, a precipitação, e não a temperatura, era o determinante principal. Ele fora levado a essa conclusão pelas suas pesquisas nos trópicos. Esse tipo de ecologia, estritamente falando, ficou conhecido como a ecologia geográfica das plantas.¹¹

Sucessão e clímax

No começo do século XX, o ecólogo americano Frederic Clements foi o primeiro a notar que uma sucessão de comunidades de plantas se desenvolvia logo após uma perturbação, como uma erupção vulcânica, uma enchente de grandes proporções, um vendaval ou um incêndio florestal. Um campo abandonado, por exemplo, será invadido sucessivamente por plantas herbáceas, arbustos e árvores, tornando-se finalmente uma floresta. Espécies que gostam de luz estão sempre entre as primeiras invasoras, enquanto espécies tolerantes à sombra aparecem mais tarde nessa sucessão.

Clements e outros ecólogos pioneiros perceberam que a ordem da sucessão tinha uma regularidade quase de lei, mas isso não foi comprovado. Um dos estudos mais cuidadosamente docu-

mentados de sucessão foi o restabelecimento de uma biota na ilha de Krakatoa, que foi completamente esterilizada por uma erupção vulcânica em 1883 (Thornton, 1995). Nessa sucessão e em outras uma tendência geral pode ser reconhecida, mas os detalhes são geralmente imprevisíveis. Um pasto abandonado na Nova Inglaterra pode ser tomado por pinheiros brancos e por bétulas-cinzentas, outro pasto vizinho pode ser invadido primeiro por zimbros, azereiros* e bordos. A sucessão é influenciada por diversos fatores: a natureza do solo, a exposição ao sol e ao vento, a regularidade das chuvas e vários outros processos aleatórios. Um estudioso pioneiro da sucessão foi o naturalista e poeta americano Henry David Thoreau (1993).

O estágio final da sucessão, chamado de clímax por Clements e pelos pioneiros da ecologia, tampouco é previsível ou tem uma composição uniforme. Há geralmente um bom grau de mudança na composição das espécies mesmo em uma comunidade madura, e a natureza do clímax é influenciada pelos mesmos fatores que influenciaram a sucessão. Não obstante, ambientes naturais maduros estão em geral em equilíbrio e mudam relativamente pouco no decorrer do tempo, a menos que o próprio ambiente sofra mudanças.

Para Clements, o clímax era um “superorganismo”, uma entidade orgânica.¹² Mesmo alguns autores que aceitaram o conceito de clímax rejeitaram a sua caracterização como um superorganismo, tal como foi proposta por Clements. Esta é, de fato, uma metáfora enganosa. Uma colônia de formigas pode ser legitimamente chamada de superorganismo porque seu sistema de comunicação é tão altamente organizado que a colônia sempre funciona como um todo e age de forma apropriada de acordo com as cir-

* Azereiro (*bird cherry*): nome dado a várias plantas do gênero *Prunus*, parentes da ameixa e do abrunho. (N. T.)

cunståncias, mas não há evidências de tal rede interativa de comunicação em uma formação vegetal em clímax. Muitos autores preferem o termo “associação” ao termo “comunidade”, de modo a enfatizar quão frouxa é essa interação.

Mais infeliz ainda foi a extensão desse tipo de pensamento de forma a incluir animais e plantas. Isso resultou no “bioma”, uma combinação de fauna e flora coexistentes. Embora seja verdade que muitos animais estão estritamente associados com certas plantas, é enganoso falar de um “bioma tuia-alce”, por exemplo, porque não existe uma coesão interna nessa associação como há em um organismo. A comunidade de tuias não é substancialmente afetada pela presença ou ausência dos alces. De fato, há vastas áreas de floresta de tuias sem nenhum alce. Sempre houve um exagero mais ou menos místico na descrição de comunidades de plantas como sendo superorganismos.

A oposição aos conceitos clementianos na ecologia de plantas foi iniciada por Herbert Gleason (1926), a quem logo se juntaram vários outros ecólogos. Seu argumento principal era que a distribuição de uma dada espécie era controlada pelos requerimentos de nicho daquela espécie e que, portanto, os tipos de vegetação eram simplesmente uma consequência das ecologias das espécies individuais de plantas.

Ecossistema

Visto que bioma, superorganismo e vários outros termos técnicos para descrever a associação entre plantas e animais em dada localidade foram criticados por uma ou outra razão, o termo ecossistema foi cada vez mais amplamente adotado. Proposto pelo ecólogo de plantas inglês A. G. Tansley (1935), o termo se refere a todo o sistema de organismos associados mais os componentes físicos de seu ambiente.

R. Lindeman (1942) acabou por enfatizar o papel de tal sistema na transformação de energia. Isso foi bem descrito por um ecólogo com as seguintes palavras: “Um ecossistema envolve a circulação, a transformação e o acúmulo de energia e matéria no meio das coisas vivas e em suas atividades”. A fotossíntese, a decomposição, a herbivoria, a predação, o parasitismo e outras atividades simbióticas estão entre os principais processos biológicos responsáveis pelo transporte e armazenamento de materiais e energia. O ecólogo, portanto, “se preocupa principalmente com as quantidades de matéria e energia que passam por dado ecossistema e com as taxas nas quais isso acontece” (Evans, 1956). A principal missão do Programa Biológico Internacional (International Biological Program — IBP) foi obter tais dados quantitativos.

Infelizmente, essa abordagem fiscalista não se revelou um grande avanço em relação a suas predecessoras. Embora o conceito de ecossistema fosse muito popular nos anos 1950 e 1960, especialmente devido ao entusiasmo de Eugene e Howard Odum, ele não é mais o paradigma dominante. Os argumentos de Gleason contra o clímax e o bioma são em grande parte válidos também contra o ecossistema. Além disso, o número de interações é tão grande que elas são difíceis de analisar, mesmo com a ajuda de grandes computadores.

Finalmente, a maior parte dos ecólogos mais jovens achou os problemas ecológicos que envolviam o comportamento e as adaptações produzidas pela história de vida mais interessantes que a medição de constantes físicas. Não obstante, ainda falamos de ecossistema quando nos referimos à associação local de plantas e animais, geralmente sem prestar muita atenção aos aspectos que envolvem energia. Um ecossistema não tem a unidade integrada que se espera de um sistema verdadeiro.

Que fatores, então, controlam o número de espécies que coexistem em dado local? A generalização mais óbvia que se pode fazer é que, quanto mais exigente o ambiente, menos espécies entrarão na composição da comunidade. Portanto, uma área com estresse alto, como o deserto ou a tundra do Ártico, terá muito menos espécies que uma floresta subtropical ou tropical. Mas isso não é tudo. Evidentemente, fatores históricos, como a origem de uma biota enquanto resultado da fusão entre duas biotas previamente separadas, bem como a adequação de determinada área à especiação (como a presença ou ausência de muitas barreiras geográficas), têm também influência grande. Isso pode explicar por que dada área na Malásia pode ter três vezes o número de espécies de árvores que uma área equivalente na Amazônia.

Duas espécies podem excluir uma à outra em um local e coexistir pacificamente em outro. Competidores potenciais podem formar as chamadas guildas, cuja composição específica pode variar de um lugar para outro. Por exemplo, nas ilhas menores da Nova Guiné, pode-se encontrar um pombo frugívoro grande, um médio e um pequeno. No entanto, qual pombo de uma série de espécies grandes, médias e pequenas estará representado em determinada ilha é algo imprevisível e aparentemente se deve ao acaso.

Não importa quão relativamente estável uma comunidade possa parecer, ela na verdade reflete um equilíbrio entre extinções e recolonizações. Isso foi claramente visto pela primeira vez por estudiosos de populações de ilhas e formulado matematicamente mais tarde, na forma da lei da biogeografia de ilha. Quanto menor a ilha, mais rápido o retorno de espécies; analogamente, quanto mais lento o retorno, maior a porcentagem de espécies endêmicas. Quanto mais tempo uma população puder sobreviver isolada em uma ilha, maior a probabilidade de ela vir a se tornar uma espécie separada.¹³

MacArthur alegou em 1955 que, quanto mais diversa uma comunidade, mais estável ela seria. May (1973) chegou à conclusão oposta, e pesquisas subseqüentes não conseguiram chegar a um consenso. O que fica evidente é que a composição de uma comunidade é o resultado de uma interação altamente complexa entre fatores históricos, físicos e bióticos, e na maioria dos casos ela só é muito aproximadamente previsível. Os fatores que a influenciam, como as características físicas do ambiente, a presença de competidores e inimigos, são em geral aparentes, mas a importância relativa desses fatores pode ser fortemente influenciada por emergências históricas.

PALEOECOLOGIA

À medida que o estudo das assembléias de fósseis amadurecia, os paleontólogos começaram a prestar cada vez mais atenção à ecologia das biotas extintas. Vários problemas ecológicos estão particularmente expressos na biota fóssil, embora as conclusões a serem tiradas dessas pesquisas estejam limitadas pelo problema da preservação diferencial. Táxons de corpo mole só se fossilizam em circunstâncias muito raras, mas mesmo aqueles com conchas e esqueletos mostram diferenças consideráveis em sua preservação. Às vezes comunidades locais inteiras parecem estar bem preservadas, como no caso de comunidades de recife. As circunstâncias de deposição e preservação são investigadas pelos métodos da tafonomia.

A área de interesse mais conspícua da paleoecologia é a extinção de grandes táxons inteiros. O que causou a extinção, por exemplo, dos trilobitas, o táxon invertebrado dominante no Paleozóico? Ou a dos amonitas, um grupo quase igualmente dominante no Mesozóico? Se a eliminação de um desses grupos coincide com um dos grandes períodos de extinção na história da Terra, podemos

atribuí-la à mesma causa que a extinção geral. Isso é verdade, por exemplo, para a derrocada dos dinossauros, que coincide com o final do Cretáceo e, como é mais ou menos consenso hoje, o impacto do asteróide Alvarez em Yucatán. A extinção dos trilobitas costuma ser atribuída à competição com os moluscos, “funcionalmente mais eficientes”, mas essa é uma inferência *post hoc, ergo propter hoc*.

A vida na Terra se originou na água, e uma das maiores revoluções ecológicas foi a conquista da terra, primeiro pelas plantas e depois pelos animais. Mas, assim como na água tivemos a substituição dos trilobitas e dos amonitas, também tivemos grandes substituições na terra. A explosão dos mamíferos após a extinção dos dinossauros é o caso mais freqüentemente mencionado, mas uma mudança bem mais drástica, embora menos completa, aconteceu entre as plantas terrestres. A vegetação dominante, que se compunha de samambaias arborescentes, cavalinhas e gimnospermas, foi em grande parte substituída durante o Cretáceo por plantas com flores (angiospermas). Um cenário plausível envolvendo polinização por insetos (em vez de pelo vento) e dispersão de sementes por aves e mamíferos foi sugerido por Regal (1977). É interessante que nesse cenário a mudança tenha sido creditada não a fatores climáticos ou fisiológicos, mas a fatores ecológicos.

CONTROVÉRSIAS EM ECOLOGIA

Poucas das principais controvérsias na ecologia, se houve alguma, foram resolvidas definitivamente. O que controla a densidade das populações é a competição ou a predação? Os fatores dependentes da densidade são mais importantes que os que não dependem dela? Há um estágio terminal em uma sucessão? Quão previsível ele é? Quão rígida é a “lei” da exclusão competitiva? Em todas essas controvérsias há hoje uma visão dominante, mas tam-

bém uma posição minoritária. Mudanças de uma para a outra podem ocorrer muito rapidamente, como na questão de se a biota mais rica é a mais estável ou não.

O pluralismo parece ser a resposta mais correta a muitas controvérsias na ecologia, se não a todas. Diferentes tipos de organismos podem obedecer a diferentes regras. Ou diferentes fatores determinantes podem prevalecer em ambientes aquáticos e terrestres. Quando dois autores discordam quanto à solução de um problema ecológico, não é necessariamente verdade que uma das duas soluções precisa estar errada. Pode ser simplesmente um caso de pluralismo.

Outras controvérsias na ecologia, como em outras áreas da biologia, são resultado de uma falha em se reconhecer tanto as causas próximas quanto as últimas. A ecologia difere da maior parte das demais disciplinas biológicas por não se encaixar precisamente nem na biologia das causas próximas nem na das causas últimas. Além disso, partes da ecologia, como a ecologia evolutiva, são dominadas por uma sinergia intrincada entre os dois tipos de causação. É importantíssimo, no estudo dos fenômenos ecológicos, discriminar entre ambas, a fim de desemaranhar de forma adequada as causas dos efeitos.

Assim como se deve usar o pensamento populacional para encontrar respostas para os problemas evolutivos, deve-se também aplicar o pensamento ecológico não só em prol da conservação, mas também com respeito a todas as nossas interações com o ambiente, incluindo todas as questões econômicas em manejo florestal, agricultura, pesca e assim por diante. E é sempre preciso lembrar que raros são os casos que permitem uma receita simples. As interações ecológicas são freqüentemente reações em cadeia, cujo resultado só se torna aparente após análises sofisticadas e minuciosas. Ninguém parece ter esperado que a destruição das colônias de aves marinhas em Nova Zembla por materiais radioa-

tivos levaria a um colapso da pesca no local. A introdução de flora ou fauna exóticas (como os coelhos na Austrália), seja deliberada ou acidental, sempre teve efeitos catastróficos inesperados. Nem tudo isso pode ser previsto ou evitado pela pesquisa ecológica, mas uma parte pode ao menos ser mitigada ou revertida. Às vezes, uma análise ecológica no momento certo pode evitar um ato cujas consequências seriam desastrosas, como a construção de uma represa.

O surgimento do homem civilizado teve impacto em quase todas as comunidades naturais de plantas. Os naturalistas, desde George Perkins Marsh e Aldo Leopold, têm apontado de quantas formas diferentes os humanos têm causado mudanças drásticas na vegetação. O desmatamento das montanhas do Mediterrâneo e, hoje, das florestas tropicais, bem como o excesso de gado (especialmente de cabras) em muitas áreas dos subtrópicos, têm tido efeitos drásticos e geralmente desastrosos sobre a paisagem natural e seus habitantes humanos. É para isso que o movimento conservacionista chama a atenção, apontando medidas (em especial o controle populacional) necessárias para evitar danos maiores.

Como todas as outras espécies, os humanos têm sua ecologia espécie-específica. Quatro grandes áreas dela interessam ao ecólogo: (1) a dinâmica e as consequências do crescimento populacional humano; (2) o uso dos recursos; (3) o impacto dos seres humanos sobre o ambiente; (4) as complexas interações entre o crescimento populacional e o impacto ambiental. Como ecólogos e ambientalistas já ressaltaram, o futuro da humanidade é, em última análise, um problema ecológico.

11. Qual é o lugar do homem na evolução?

Na maioria das culturas primitivas, na filosofia grega e, muito marcadamente, na religião cristã, os humanos eram considerados uma entidade completamente separada do restante da natureza. Foi apenas no século XVIII que alguns autores audaciosos chamaram a atenção para a semelhança entre o homem e os grandes macacos;* Lineu, por exemplo, chegou a incluir os chimpanzés no gênero *Homo*. Mas talvez a primeira pessoa a postular claramente que os humanos descendem dos primatas tenha sido o naturalista francês Lamarck (1809). Ele chegou até a oferecer um esquema para explicar como os humanos haviam descido das árvores e adquirido o bipedalismo, e como o formato da face humana fora alterado por uma mudança na dieta.

Mas foi a teoria da origem comum de Darwin que tornou inescapável a conclusão de que os humanos de fato descendiam de

* Grandes macacos: no original, *apes*, palavra inglesa que designa o grupo dos grandes primatas, formado por humanos, chimpanzés, gorilas, orangotangos, gibões e *siamangs*. (N. T.)

ancestrais semelhantes a macacos; a evidência morfológica comparativa se tornara esmagadora. Poucos anos depois, Huxley, Haeckel e outros estabeleceram firmemente o princípio de que não havia nada de sobrenatural na origem dos seres humanos. Não mais isolado do restante do mundo vivo, o *Homo sapiens* e sua história evolutiva se secularizaram como um ramo da ciência.

De forma lenta, mas inexorável, uma nova disciplina biológica, a biologia humana, começou a se desenvolver. Ela tinha múltiplas raízes: na antropologia física, na anatomia comparada, fisiologia, genética, demografia, antropologia cultural, psicologia e em outras disciplinas. Sua missão se dividia em duas: mostrar como os humanos são únicos em comparação com todos os outros organismos, mas ao mesmo tempo mostrar também como as características humanas evoluíram a partir das de seus ancestrais.

Como seria possível resolver a aparente contradição entre o fato de que os humanos eram animais e ao mesmo tempo eram tão diferentes de quaisquer outros animais, mesmo de seus parentes mais próximos dentre os grandes macacos? Quanto mais cuidadosamente estudavam a humanidade, bem como o restante do mundo da vida, mais impressionados os cientistas ficavam diante da extrema improbabilidade dos seres humanos. Como tal criatura extraordinária poderia ter emergido do reino animal?

Sempre que os seres humanos eram tratados na literatura pré-darwinista, por exemplo, por Lamarck, sua ascensão sempre era explicada como o ápice inevitável de uma tendência a uma perfeição cada vez maior; o homem era o degrau mais alto da *scala naturae*. Mas Darwin tornou essa interpretação teleológica desnecessária; sua teoria da seleção natural explicou de forma mecanicista todos os fenômenos que antes só eram explicáveis lançando-se mão de conceitos metafísicos. A ciência biológica agora tinha uma missão clara. Ela precisava explicar a evolução gradual dos seres humanos a partir de seus ancestrais primatas como resultado

de processos evolutivos comuns — em especial a seleção natural — que operavam no restante do mundo vivo.

Outra ideologia poderosa que acabou sendo eliminada do estudo da evolução humana após 1859 foi o essencialismo. O novo conceito darwinista de pensamento populacional, que ressaltava a singularidade de cada indivíduo de uma dada população, tinha de ser aplicado também aos seres humanos. Os antropólogos tardaram a fazer isso, mas, quando finalmente o fizeram, colheram resultados magníficos.

Ainda assim, muito da evolução do *Homo sapiens* é um enigma, mesmo hoje. Quando e onde a linhagem dos hominídeos divergiu da linhagem dos macacos (pongídeos) que levou aos chimpanzés modernos? Depois da separação entre as linhagens, por que estágios a cepa dos hominídeos passou antes de alcançar um nível verdadeiramente humano?

O PARENTESCO ENTRE OS HUMANOS E OS GRANDES MACACOS

Nas primeiras árvores genealógicas humanas construídas no período pós-Darwin, o ponto de divergência da linhagem humana era colocado numa época muito antiga. No entanto, todos os esforços para encontrar hominídeos fósseis datados de 13 milhões a 25 milhões de anos atrás (durante o Mioceno) foram infrutíferos. Durante algum tempo, um fóssil de primata asiático, o *Ramapithecus*, de cerca de 14 milhões de anos, foi cogitado como sendo mais próximo dos humanos do que de todos os outros grandes macacos, mas depois se demonstrou que ele pertencia à linhagem dos orangotangos.

A descoberta dos fósseis de neandertal em 1849 em Gibraltar marcou o começo dos estudos dos hominídeos antigos. Durante os quarenta anos que se seguiram, todos os fósseis de hominídeo

encontrados eram ou *Homo sapiens* ou neandertais. Então, em 1892, Dubois encontrou um hominídeo antigo em Java, que ele batizou de *Pithecanthropus erectus*; sua vicariante na China, o Homem de Pequim (chamado *Sinanthropus pekinensis*), foi descrita em 1921. Ambos foram, mais tarde, combinados com fósseis africanos na espécie *Homo erectus* (ver abaixo).

Mas o verdadeiro “elo perdido” só seria encontrado em 1924, quando Dart descreveu um fóssil da África do Sul que ele considerou ser uma forma intermediária entre humanos e grandes macacos. Ele o chamou de *Australopithecus africanus*. Dali em diante, diversos fósseis de australopitecinos foram encontrados no sul e no leste da África. Eles geralmente são divididos em dois ramos: um de formas gráceis, ao qual pertence o *Australopithecus africanus*, e que acabaria dando origem ao gênero *Homo*, e um ramo lateral de formas robustas, representado no sul da África pelo *Australopithecus robustus* (de 2 milhões a 1,5 milhão de anos atrás) e no leste da África pelo *Australopithecus boisei* (2,2 milhões a 1,2 milhão de anos atrás)*.¹ Um crânio encontrado a oeste do lago Turkana, o “crânio negro”, representa uma terceira espécie robusta, o *A. aethiopicus* (2,5 milhões a 2,2 milhões de anos atrás). Esta provavelmente é ancestral do *boisei*.² A linhagem robusta se extinguiu há cerca de 1 milhão de anos.

Durante muito tempo se achou que o ramo grácil dos *Australopithecus* contivesse duas espécies de cérebro pequeno: uma setentrional (*A. afarensis*), da Tanzânia à Etiópia (3,5 milhões a 2,8 milhões de anos atrás) e uma austral (*A. africanus*), no sul da África (3 milhões a 2,4 milhões de anos atrás). Essas duas espécies de hominídeo eram bípedes, mas seus braços relativamente longos e outras características indicam que eram semi-arbóreas. Seu cérebro era praticamente

* Hoje é praticamente consenso entre os paleoantropólogos que os australopitecos robustos pertencem a um gênero distinto, o *Paranthropus*. (N. T.)

do mesmo tamanho do dos chimpanzés modernos, e elas provavelmente estavam mais para macacos do que para seres humanos.

Enquanto as pesquisas antropológicas continuavam, evidências moleculares maciças confirmavam não só que a espécie humana é parente próxima dos grandes macacos africanos, mas também que, para a surpresa de todos, o chimpanzé é mais aparentado com os humanos que com os gorilas; ou seja, a linhagem dos gorilas divergiu do tronco dos chimpanzés um pouco antes que a humana.³ Evidências moleculares sugerem que a separação entre humanos e chimpanzés ocorreu recentemente, de 5 milhões a 6 milhões de anos atrás.⁴

Apesar de numerosas expedições e procuras diligentes por toda a África, por muitos anos não foi encontrada nenhuma espécie de australopitecino mais velha que o *A. afarensis*. Então, em 1994, foi descoberta uma espécie na Etiópia que, segundo se determinou, viveu há 4,4 milhões de anos, perto da época estimada da divergência entre a linhagem dos hominídeos e a dos chimpanzés. O estudo desse material está apenas começando, mas esse fóssil tem mais semelhanças com os chimpanzés do que o *A. afarensis*. O fóssil etíope, batizado *Ardipithecus ramidus*, é hoje o mais velho fóssil de hominídeo conhecido. Depois da sua descoberta, ossos do pé e dentes mais antigos que os do *A. afarensis* e o *A. africanus* foram encontrados no leste e no sul da África, documentando os passos intermediários entre o *ramidus* e o *afarensis/africanus*. Nenhum vestígio verdadeiramente revelador foi descoberto para o período entre 8 milhões e 4,4 milhões de anos atrás.*

* Depois da publicação deste livro, duas outras espécies que disputam o título de hominídeo mais antigo foram encontradas: o *Orrorin tugenensis*, de 6 milhões de anos (Quênia), e o *Sahelanthropus tchadensis*, de 7 milhões de anos (Chade), o que recuaria a divergência entre humanos e chimpanzés para mais de 7 milhões de anos atrás. Em um livro de 2001 (*What evolution is*), Mayr situa a divergência entre 5 milhões e 8 milhões de anos atrás. (N. T.)

É muito provável que o ancestral comum entre humanos e chimpanzés tenha, como os chimpanzés, usado os nós dos dedos das mãos para caminhar, e que cada característica — desde as extremidades, o crânio, o cérebro e os dentes até as macromoléculas — tenha evoluído em seu próprio passo (um processo chamado “evolução em mosaico”). Em outras palavras, o “tipo” *Homo* não evoluiu como uma unidade. Mesmo hoje, humanos e chimpanzés são extraordinariamente semelhantes na estrutura da hemoglobina e de outras macromoléculas, diferindo profundamente no desenvolvimento do cérebro e nos comportamentos a ele associados.

A ascensão do Homo habilis, do Homo erectus e do Homo sapiens

Entre 1,9 milhão e 1,7 milhão de anos atrás, os australopitecinos gráteis deram origem a uma nova espécie, chamada *Homo habilis*. Ela é caracterizada pelos seus traços craniais distintos e pelo maior tamanho do cérebro, e ferramentas simples de pedra estão presentes em todos os lugares onde há fósseis de *habilis*. Os homínídeos *habilis* eram à primeira vista muito intrigantes, devido à variação aparentemente grande no tamanho do corpo e do cérebro das amostras. Afinal, concluiu-se que se tratava de duas espécies distintas, e a maior delas foi chamada de *Homo rudolfensis*.

Acredita-se que o *Homo habilis* tenha sido ancestral do *Homo erectus*, uma espécie maior e com um cérebro consideravelmente maior. No entanto, o *Homo erectus* aparece no registro fóssil da África na mesma época que o *habilis*, ou seja, cerca de 1,9 milhão de anos atrás, e os estilos de vida do *habilis* e do *erectus* podem ter sido parecidos, exceto pelo fato de que algumas populações de *erectus* parecem ter dominado o fogo. O *Homo erectus* talvez tenha sido o primeiro homínídeo a trocar uma dieta em grande parte vegetariana por um carnivorismo parcial. Em outras palavras, essa espécie se tornou carniceira e caçadora.

O *Homo erectus* foi aparentemente muito bem-sucedido e se espalhou com rapidez através do Oriente Médio da África para a Ásia, onde seus restos mais antigos foram achados em Java, há cerca de 1,9 milhão de anos. A espécie demonstra alguma variação geográfica, embora seja intrigante ver quão pouca evolução aconteceu entre os *H. erectus* mais antigos e os mais recentes (cerca de 300 mil anos atrás). Apenas ferramentas de pedra simples são encontradas juntamente com os vestígios mais velhos; machadinhas mais complexas (bifaces) começam a aparecer nos estratos há 1,5 milhão de anos, mas não avançam quase nada no milhão de anos seguinte. O *Homo habilis* já tinha ferramentas de pedra primitivas há 1,9 milhão de anos.

A espécie *Homo sapiens*, à qual pertencem os humanos modernos, de alguma forma evoluiu dos *H. erectus*, mas como e onde isso aconteceu ainda é motivo de controvérsia. Há duas teorias principais para a origem dos humanos modernos. Uma é que eles evoluíram paralelamente em todas as regiões, a partir de populações locais de *H. erectus*. Essa teoria multirregional foi originalmente baseada em uma suposta semelhança entre as raças geográficas do *Homo sapiens* moderno e seus correspondentes fósseis de *H. erectus* na África, na China e nas Índias Orientais. Isso levou Coon (1962) a teorizar que uma pressão de seleção que favorecia um cérebro maior em toda a zona de distribuição do *Homo erectus* levou, no tempo devido, à conversão gradual do *H. erectus* politípico em *H. sapiens* politípico.

A teoria concorrente é às vezes chamada de hipótese da “Eva mitocondrial” e é baseada em reconstruções de DNA mitocondrial. De acordo com esse cenário, em algum momento entre 200 mil e 150 mil anos atrás uma onda colonizadora de uma nova espécie, surgida na África subsaariana, deu origem a todas as populações de humanos existentes hoje. Essa espécie (*Homo sapiens sapiens*), diz a teoria, surgiu de *Homo sapiens* arcaicos (eles mesmos descenden-

tes do *Homo erectus* africano) em algum lugar da África subsaariana há menos de 200 mil anos. O *Homo sapiens sapiens* pode ser encontrado no Oriente Médio há cerca de 100 mil anos; nas Índias Orientais, Nova Guiné e Austrália há cerca de 60 mil anos; na Europa ocidental há cerca de 40 mil anos (onde seus vestígios são conhecidos como Homem de Cro-Magnon); e no Extremo Oriente há cerca de 30 mil anos. O esqueleto do Cro-Magnon é muito semelhante ao dos humanos atuais e considera-se que seja da mesma espécie. Ele foi responsável pelos exemplos mais belos de arte rupestre, em Chauvet, Lascaux e Altamira, e pelas melhores ferramentas de pedra.

Em 1994, Ayala produziu evidências moleculares que aparentemente refutavam a hipótese da Eva e apoiariam a teoria da continuidade regional na evolução humana da época do *Homo erectus* até o presente. Ele acredita que a alta frequência de polimorfismos antigos no pool genético humano exclui a possibilidade de que a espécie humana tenha passado por um gargalo populacional, como alega a hipótese da Eva.

A aceitação de uma teoria multirregional da evolução humana ajudaria a explicar outro quebra-cabeça apresentado pelo registro fóssil: o fato de que, da China e de Java até a Europa ocidental e mesmo a África, foram encontrados fósseis de *Homo sapiens* arcaico que ainda são muito semelhantes ao *H. erectus*, mas que têm um cérebro maior (cerca de 1200 centímetros cúbicos). Esses fósseis aparentemente intermediários datam de 500 mil a 130 mil anos atrás.

Os neandertais e o Homem de Cro-Magnon

Desde a descoberta dos fósseis de neandertal em 1849 em Gibraltar, o relacionamento entre o *Homo sapiens* e os neandertais tem sido objeto de uma briga contínua. Sabemos hoje que entre

130 mil e 150 mil anos atrás, no Ocidente, muito antes da chegada do Homem de Cro-Magnon (*Homo sapiens sapiens*), populações arcaicas de *sapiens* foram substituídas pelos neandertais, cujo território ia da Espanha (Gibraltar) e atravessava a Europa até a Ásia ocidental (Turquestão), e se estendia ao sul até o Irã e a Palestina (mas não até a África ou Java). Os neandertais tinham um cérebro em média maior que o dos humanos modernos (com até 1600 centímetros cúbicos), mas possuíam uma cultura lítica primitiva e não demonstraram nenhuma mudança evolutiva durante os mais de 100 mil anos de sua existência. O ramo neandertal da linhagem dos hominídeos se extinguiu há cerca de 30 mil anos, ou um pouco menos, muito depois de os Cro-Magnon terem invadido a Europa.

Os neandertais e os Cro-Magnon eram duas raças geográficas ou duas espécies diferentes? Devido às suas grandes diferenças físicas, eles primeiro foram considerados duas espécies distintas. Mas, então, com base na crença de que excluía um ao outro geograficamente, foram reduzidos ao nível de raças geográficas (subespécies). Foram mais uma vez elevados a espécies quando se achou que os homens modernos e os neandertais haviam coexistido na Palestina em cavernas diferentes na mesma área durante um período de 40 mil anos (entre 100 mil e 60 mil anos atrás). Mas aquele foi um período de grandes flutuações climáticas, e acabou sendo determinado que os neandertais viveram na Palestina durante os períodos mais frios, enquanto o *H. sapiens sapiens* habitou a área durante as épocas mais quentes e áridas. Portanto, embora ambos os hominídeos sejam encontrados na mesma região, no geral não coexistiram no mesmo lugar e ao mesmo tempo.

Quando se consideraram os neandertais como conspecíficos dos humanos modernos, alguns fósseis das cavernas da Palestina foram interpretados como sendo um registro de um cruzamento entre os dois tipos. Isso não é apoiado por uma análise mais recente; e, apesar de terem coexistido por 10 mil a 15 mil anos, não

se encontraram em nenhum lugar da Europa evidências [amplamente aceitas] de cruzamento entre ambos. Os neandertais desapareceram cerca de 15 mil anos depois que o *Homo sapiens sapiens* invadiu área até então ocupada por eles na Europa. No leste e no sul da Ásia, os *sapiens* arcaicos também desapareceram, sendo substituídos pelos *sapiens* modernos.

Classificando táxons fósseis de homínídeos

Antes da década de 1950, o estudo das origens humanas era virtualmente monopólio dos anatomistas, e a classificação dos homínídeos era dominada por um pensamento finalista e tipológico. Havia pouca consideração da singularidade dos indivíduos ou da enorme variação que existe dentro de uma espécie. Cada fóssil era considerado um tipo diferente e geralmente recebia um nome binomial, e todos eles eram considerados membros de uma série ascendente única, que conectava os ancestrais primatas ao homem moderno.⁵

Mas os fósseis descobertos, na verdade, não confirmavam essa construção conceitual tanto quanto se esperava. Um aspecto especialmente perturbador era o surgimento repentino de novos tipos de homínídeos aparentemente sem conexão alguma com qualquer tipo precedente. Por exemplo, há um enorme hiato entre o *Homo habilis* e seu suposto ancestral, o *Australopithecus africanus*, e também entre o *Homo erectus* e seu suposto ancestral, o *Homo habilis*, e entre o *Homo sapiens* e seu ancestral, o *Homo erectus*. Outra incongruência era manifestada na dificuldade em colocar achados geograficamente distantes na mesma sequência linear ou coluna vertical.

Aqueles que adotaram um pensamento tipológico e unidimensional obviamente não tinham consciência da ampla especiação geográfica entre os tetrápodes. A maioria das espécies de pri-

mata exibe especiação geográfica, e a maioria dos gêneros de primata (exceto aqueles muito grandes, como os lêmures e os *Cercopithecus*) ainda consiste em espécies alopatricas. Há várias razões para acreditar que os fósseis de homínídeos também consistissem em espécies alopatricas. Isso é confirmado pela restrição do *Australopithecus africanus* ao sul da África e do *afarensis* ao norte, e a do *Australopithecus robustus* ao sul da África e do *boisei* a leste.

A área que vai do leste ao sul da África onde a maioria dos fósseis de homínídeos foi encontrada é pequena, e populações fundadoras de espécies adicionais de homínídeos podem ter ocorrido em vastas áreas da África central, ocidental e setentrional que ainda não foram exploradas. (Com efeito, fósseis de australopithecinos de 3,5 milhões a 3 milhões de anos de idade foram encontrados muito recentemente no Chade, na África central.) Literalmente dúzias de alospécies de *ramidus*, *afarensis*, *robustus*, *habilis* e *erectus* podem ter vivido em partes inexploradas da África. O fato de parte da transição no registro fóssil parecer repentina poderia ser explicado por “brotamento”.⁶ Isso significa que o tipo descendente se originou em algum lugar numa população periféricamente isolada e estabeleceu contato com a população-mãe somente após ter completado sua reestruturação genética. A chance de que algum dia venhamos a descobrir a localização de tais isolados é mínima.

Quando apenas uns poucos homínídeos fósseis eram conhecidos, era fácil classificá-los em espécies: *afarensis*, *africanus*, *habilis*, *erectus* e *sapiens*. Cada um desses nomes representava um tempo de evolução de 0,25 milhão a 1,5 milhão de anos. Nos últimos anos, várias descobertas adicionais se situam ou num período intermediário entre espécimes típicos ou em diferentes regiões geográficas — portanto, tampouco são exatamente típicos. Elas geralmente exibem um bom grau de evolução em mosaico: alguns de seus caracteres são os de seus ancestrais, alguns são os de seus descendentes e o resto é intermediário.

A maneira de encaixar o *Homo sapiens* no sistema taxonômico provocou as mais amargas discórdias, que resultavam primariamente das diferenças nos caracteres usados de um sistema de classificação para o outro. Julian Huxley (1942), baseando seu julgamento na singularidade da espécie humana, especialmente no tocante à sua cultura e à dominação do mundo, surgiu que se erguesse um reino separado, o Psychozoa, para o *Homo sapiens*. Meio século mais tarde, Diamond (1991) derivou para o extremo oposto, ao colocar os chimpanzés no gênero *Homo* com base em sua semelhança molecular. Enquanto Huxley pôs uma ênfase exagerada na singularidade humana, Diamond caiu no erro oposto ao ignorá-la por completo.

Um dos mais antigos axiomas da classificação é que os caracteres devem não apenas ser contados, mas também pesados. A evolução acelerada do sistema nervoso central humano, o período enormemente expandido de cuidado parental e todos os avanços psicológicos, sociais e culturais que isso permitiu certamente justifica situar a espécie humana ao menos num gênero separado do *Pan* (chimpanzés), a despeito de todas as semelhanças moleculares. Segundo os critérios de Diamond, o *Australopithecus* também seria um sinônimo de *Homo*, e nossa nomenclatura não mais poderia refletir os graus de diferença entre os vários tipos de homínido.

Hoje há um consenso razoável a respeito dos três tipos principais de homínidos fósseis e seu relacionamento, mas a reconstrução detalhada das superespécies politípicas de homínidos fósseis só será possível após a descoberta de mais fósseis, juntamente com a prática consistente do pensamento populacional. Tal pensamento começou a adentrar a antropologia física por volta de 1950, mas mesmo hoje o *Australopithecus africanus* e o *Homo erectus* são considerados tipos. Quão disseminadas eram essas populações e (no caso do *Homo erectus*) quanta variação geográfica elas exibiam é algo que os antropólogos físicos fre-

quentemente ignoram, assim como a possibilidade da existência de várias populações perifericamente isoladas.

COMO O HOMEM SE TORNOU HUMANO

O que possibilitou a ascensão dos seres humanos e em que seqüência as características humanas foram adquiridas? Durante muito tempo, os estudiosos da evolução humana se confortaram com o seguinte cenário: à medida que o clima da África foi se tornando mais seco no Mioceno, muitos bandos de ancestrais humanos ficaram isolados em paisagens mais abertas, onde caminhar sobre dois pés era vantajoso. A liberação dos braços e das mãos estimulou o uso de ferramentas, e isso, por sua vez, exerceu uma pressão seletiva sobre o aumento do tamanho do cérebro para a invenção e o uso de novas ferramentas. Nesse cenário, portanto, o bipedalismo é a chave para a humanização, via uso de ferramentas.

Diversas evidências recentes sobre a transição dos grandes macacos aos humanos refutam essa história simples. É verdade que, entre os mamíferos, o andar bípede e ereto constante é exclusividade dos humanos. Há mamíferos bípedes saltadores, como os cangurus e alguns roedores, e alguns que podem se erguer em suas patas posteriores, como certos primatas e ursos, ou ocasionalmente até andar sobre duas pernas, como os macacos-aranha, os gorilas e os chimpanzés, mas isso nunca é o seu modo primário de locomoção.

No entanto, o bipedalismo não pode, sozinho, responder pelo uso de ferramentas, e somente o uso de ferramentas não pode responder pelo crescimento explosivo do cérebro humano. O extenso uso de ferramentas pelos chimpanzés, embora nem sempre necessariamente homólogo ao humano, sugere que o uso de ferramentas entre os homínidos estava bem estabelecido antes de o bipedalismo evoluir. E, por quase 2 milhões de anos depois que as

primeiras ferramentas humanas apareceram no registro fóssil, houve pouco avanço na tecnologia de fabricação. Além disso, o bipedalismo não correspondeu a princípio a nenhum aumento digno de nota no tamanho do cérebro. Durante os 2 milhões de anos ou mais que várias espécies de australopitecinos viveram, essas espécies eram bípedes, mas por quase qualquer outro critério ainda se tratava de macacos. A capacidade de andar eretos não fez com que esses animais se tornassem parecidos com os humanos no tamanho do cérebro, ainda bem pequeno entre eles.

Os primeiros australopitecinos ainda eram semi-arbóreos, com pés adaptados para subir em árvores e com braços proporcionalmente mais longos que os dos hominídeos fósseis posteriores e os dos humanos modernos. Conseqüentemente, suas crias precisavam ser bem desenvolvidas no momento em que nasciam, de modo a poderem se agarrar à mãe durante suas atividades arbóreas, como os filhotes de várias espécies de grandes macacos fazem hoje. Entre 2 milhões e 2,5 milhões de anos atrás, no entanto, uma transição para uma vida inteiramente terrestre liberou os braços e as mãos das mães para carregar os bebês, e isso permitiu um prolongamento da fase de dependência total do recém-nascido. Esse desenvolvimento mais lento, por sua vez, permitiu o crescimento contínuo do cérebro na primeira infância, tão característico da espécie humana. Assim, o principal impacto do bipedalismo foi sobre a maternagem, e não sobre o uso de ferramentas.⁷

Tudo indica que esses traços diagnósticos iniciais do *Homo* — o bipedalismo completo e o transporte de crianças no colo — evoluíram em uma população periféricamente isolada de australopitecinos, e não nos australopitecinos como um todo. Sem dúvida isso foi facilitado pela disponibilidade de um nicho ecológico apropriado, mas provavelmente jamais saberemos ao certo.

A aquisição do andar ereto pelos ancestrais dos humanos demandou uma razoável remodelagem no seu aparelho loco-

tor. A transição dos hábitos arbóreos e do bipedalismo parcial dos australopitecinos graças para o bipedalismo terrestre permanente do *Homo erectus* foi um período de evolução acelerada, mas a postura ereta ainda não foi aperfeiçoada, como indica a quantidade de humanos modernos com problemas nas costas e nos sinus.

Os australopitecinos eram sobretudo vegetarianos, como os chimpanzés de hoje. A transição completa para o bipedalismo terrestre quando o *Homo erectus* evoluiu, acreditava-se, levou à mudança de uma dieta vegetariana para uma carnívora, ou seja, ao desenvolvimento da caça. Além disso, os dentes fortes e a musculatura facial pesada do *Homo erectus* em relação aos humanos modernos levou os primeiros autores à visão errônea de que esses hominídeos eram brutos selvagens. Evidências recentes, baseadas no estudo do desgaste dentário e na reinterpretação dos chamados sítios-acampamento, no entanto, não confirmam esse cenário. Embora animais ocasionalmente pareçam ter integrado a dieta do *Homo erectus*, como integram a dos chimpanzés, a caça de animais grandes foi aparentemente um desenvolvimento tardio na nossa história.

Um estágio intermediário talvez tenha sido uma mescla entre a caça e o aproveitamento de carcaças deixadas por grandes predadores (leões, leopardos, hienas). O bipedalismo era sem dúvida vantajoso ao permitir que grupos de hominídeos seguissem manadas de ungulados, que forneciam as carcaças. Havia também uma grande vantagem em conseguir carregar os bebês junto; os bandos de hominídeos não estavam mais confinados a um território pequeno, limitado pela localização dos filhotes, como era o caso de vários outros mamíferos. No entanto, os hominídeos não têm a resistência a intoxicação por ptomaína exibida por carniceiros legítimos; portanto, é improvável que qualquer hominídeo fosse um carniceiro primário. Trevino (1991) apresentou evidências persuasivas de que os primeiros *sapiens* retiravam boa parte de sua dieta de sementes de gramíneas e cereais selvagens.

Não obstante, a transição para a caça em grande escala provavelmente desempenhou um papel importante no processo de humanização. Ela estimulava o estabelecimento de acampamentos mais elaborados e demandava o planejamento das caçadas, o desenvolvimento de estratégias de caça e a criação de armas mais eficientes. E, o mais importante, muitos aspectos desse modo novo de vida requeriam um sistema aprimorado de comunicação, a saber, a fala.

Coevolução de linguagem, cérebro e mente

Os australopitecinos tinham um cérebro pequeno, de macaco (de 400 a 500 centímetros cúbicos), ao passo que o do *Homo erectus* era muito maior (de 750 a 1250 centímetros cúbicos). Mas cérebros realmente grandes evoluíram apenas nos últimos 150 mil anos — uma fração do período desde que a linhagem humana se separou da dos chimpanzés. Que pressão de seleção favoreceu tamanha explosão na evolução do cérebro humano?

Além de carregar bebês e caçar, os principais fatores que favoreceram um aumento no tamanho do cérebro foram o desenvolvimento da fala e a aquisição da transmissão cultural entre as gerações que ela permitia. Seria fútil destacar um desses fatores como o dominante, porque todos eles estão interconectados e deram uma contribuição conjunta.

A linguagem não existe entre os animais. Claro, muitas espécies têm sistemas elaborados de comunicação vocal, mas estes consistem num intercâmbio de sinais; não há sintaxe nem gramática. Quando se dispõe apenas de sinais, não é possível relatar a história de acontecimentos passados ou fazer planos detalhados para o futuro. Por mais de quarenta anos, vários pesquisadores tentaram ensinar a linguagem humana a chimpanzés, mas em vão. Esses animais demonstraram uma inteligência notável ao adquirir um

vocabulário grande, e empregaram essa inteligência para usar os sinais corretos, mas seu sistema de comunicação é incapaz de expressar as coisas que só uma linguagem pode expressar.

Há um hiato enorme entre as sinalizações de um chimpanzé (ou de qualquer outro animal) e uma linguagem genuína. Os linguistas por um tempo acharam que poderiam encontrar um sistema intermediário de comunicação se estudassem as línguas das tribos humanas mais primitivas que sobrevivem hoje. Para azar deles, todas essas tribos, sem exceção, têm línguas maduras e altamente complexas. Vários cenários foram criados para descrever como uma língua poderia evoluir a partir de um sistema de sinais, mas, uma vez que não temos nenhuma “língua fóssil” para preencher os buracos, nunca teremos certeza.⁸ A melhor forma de iluminar a evolução da linguagem é talvez estudar a aquisição de linguagem pelas crianças. Darwin foi um dos pioneiros nesse esforço. Tais estudos hoje vêm sendo conduzidos por vários psicolinguistas, mas eles precisam ser feitos comparativamente entre crianças de línguas com gramáticas drasticamente diferentes.

O desenvolvimento da fala exerceu uma pressão seletiva não somente sobre o sistema nervoso, mas também sobre todo o aparelho vocal da laringe e nas áreas vizinhas do sistema respiratório. Algumas evidências sugerem que o aparelho vocal dos australopitecinos não teria permitido a fala propriamente dita. A linhagem do *Homo*, no entanto, estava pré-adaptada para o desenvolvimento da fala devido à posição baixa da laringe, à forma oval da arcada dentária, à ausência de espaços grandes entre os dentes, à separação entre o osso hióide e a cartilagem da laringe, à mobilidade geral da língua e ao formato abobadado do palato. Os neandertais não tinham algumas dessas propriedades anatômicas e, portanto, acredita-se que tivessem uma articulação inferior dos sons.

Será que a incapacidade de produzir uma linguagem verdadeira poderia ajudar a explicar por que os neandertais não usavam

melhor o seu cérebro, que era tão volumoso quanto o dos humanos modernos grandes? A cultura neandertal era relativamente primitiva se comparada com a dos humanos modernos, como indicavam suas toscas ferramentas de pedra. Os neandertais também não tinham arco-e-flecha, equipamentos de pesca e assim por diante. Mas os primeiros *sapiens* provavelmente também tinham uma cultura empobrecida. Serão necessárias muito mais pesquisas para esclarecer esta e outras incertezas que existem sobre a coevolução de linguagem, cérebro e cultura.

Quando a fala se desenvolveu, aproximadamente entre 300 mil e 200 mil anos atrás, em pequenos grupos de caçadores-coletores, devido a uma recompensa seletiva para uma comunicação aprimorada, a situação era favorável a um maior aumento do cérebro. No entanto, há cerca de 100 mil anos, esse aumento parou de repente e, da época dos neandertais e dos humanos modernos robustos até o presente, o cérebro humano permaneceu do mesmo tamanho. Seria de esperar que ele continuasse a crescer nos 100 mil anos que precederam o desenvolvimento da agricultura, há 10 mil anos. Um Grande Salto na cultura, como Diamond o chama, parece ter acontecido muito rapidamente durante esse período, e ainda assim ele não encontrou correspondência no aumento do cérebro ou em mudanças em outras características físicas. Já se especulou muito sobre as razões disso, mas nenhuma resposta convincente foi encontrada até agora.⁹

Um fator a influenciar a interrupção do crescimento do cérebro talvez tenha sido o aumento no tamanho do bando. Os humanos primitivos provavelmente tinham uma estrutura populacional similar à dos bandos de chimpanzés ou das pequenas tribos de caçadores-coletores. Nesses grupos pequenos, a mortalidade teria sido alta, poucos membros teriam sucesso reprodutivo e o fluxo gênico teria sido limitado. Todos esses fatores favorecem uma alta taxa de evolução sob pressões seletivas fortes, resultando no aumento do cérebro.

Uma vez que bandos maiores se tornaram a norma entre os humanos, a vantagem reprodutiva do líder presumivelmente mais bem-dotado teria sido reduzida, o fluxo gênico teria aumentado entre todos os membros do bando e aqueles com cérebros menores teriam tido mais proteção, sobrevivência mais longa e maior sucesso reprodutivo do que se o tamanho do grupo tivesse permanecido pequeno. Em outras palavras, a maior integração social entre os humanos, ao mesmo tempo em que contribuía enormemente para a evolução cultural, pode ter feito com que eles entrassem em um período de estase na evolução do genoma.

Como os estudos evolutivos podem iluminar a origem da mente humana? O estudo da mente há muito tem sido atrapalhado por confusões semânticas, o que tendeu a restringir o termo às atividades mentais dos seres humanos. Pesquisadores de comportamento animal hoje estabeleceram que não há uma diferença categórica entre as habilidades mentais de certos animais (elefantes, cães, baleias, primatas e papagaios) e as dos seres humanos. O mesmo vale para a consciência, da qual são encontrados traços entre invertebrados e talvez até entre protozoários. A mente e a consciência não constituem uma demarcação entre o homem e “os animais”.

A mente humana parece ter sido o produto final de uma concatenação de numerosas miniemergências, tanto nos nossos ancestrais primatas quanto nos hominídeos. Simplesmente não houve uma emergência instantânea. Produto de um sistema nervoso central incrivelmente complexo, a mente surgiu muito gradualmente, embora a taxas desiguais em fases diferentes. O período durante o qual a linguagem evoluiu, permitindo tanto o aprimoramento da comunicação quanto a evolução da cultura, foi com certeza um período de emergência acelerada da mente.

Uma coisa que aprendemos nos últimos quarenta anos foi que a evolução, embora contínua, pode avançar em pulsos bem definidos, e que nem todas as características de um sistema evo-

luem ao mesmo tempo ou às mesmas taxas. A transição entre ser “apenas um animal”, como exemplificado pelos australopitecinos gráteis, e ser aquela espécie única, o homem moderno, sempre foi gradual, mas caracterizada por mudanças drásticas na taxa de transformação.

EVOLUÇÃO CULTURAL

Dos australopitecinos até o *Homo habilis*, passando pelo *Homo erectus* e o *Homo sapiens* arcaico até o *Homo sapiens sapiens*, há cerca de 200 mil anos, as características físicas da linhagem dos hominídeos atravessaram mudanças constantes, que levaram à postura ereta, à fala e a um cérebro grande. Por muito tempo se assumiu que a *cultura* humana tivesse experimentado paralelamente um desenvolvimento paulatino. No entanto, esse não foi o caso. Durante 85% do tempo de evolução dos hominídeos não houve um avanço notável da cultura.

Um dos desdobramentos mais importantes da evolução cultural humana foi a integração social nos grupos de hominídeos. Entre os primatas, algumas espécies, como os orangotangos, são mais solitárias, enquanto outras, como os babuínos e os chimpanzés, vivem em grupos sociais muito maiores. A transição, na época do *Homo erectus*, para um estilo de vida estritamente terrestre foi acompanhada por um aumento no tamanho do grupo. As vantagens óbvias disso eram uma melhor proteção contra predadores, uma maior capacidade de lidar com grupos de competidores da mesma espécie e uma eficiência aumentada na busca de novos recursos, especialmente comida.

Como resultado, o grupo em si se tornou o alvo da seleção, e muitas mudanças comportamentais e psicológicas que facilitaram a sobrevivência, a prosperidade e o sucesso reprodutivo do grupo

como um todo seriam favorecidas pela seleção natural. Isso inclui a receptividade sexual contínua das fêmeas, a ovulação sem sinais externos, o desenvolvimento da menopausa, a extensão da expectativa de vida e outras características dos humanos modernos que não são encontradas nos grandes macacos, nem mesmo nos chimpanzés.

Sem dúvida, houve um bocado de competição feroz entre grupos e tribos vizinhas, em que os grupos superiores frequentemente eliminavam os inferiores. O desaparecimento dos neandertais da Europa ocidental continua sem explicação. Eles parecem ter coexistido por 15 mil anos com os Cro-Magnon, cuja cultura e comunicação eram muito mais avançadas, e não se pode excluir o genocídio como explicação para a derrocada dos neandertais. Esse não seria um fato novo na linhagem dos antropóides. Várias observações de grupos de chimpanzés exterminando sistematicamente grupos vizinhos concorrentes foram feitas nos últimos anos.

Entre os animais sociais, os benefícios da cooperação são compensados em algum grau pelo potencial de conflito que surge dentro do próprio grupo, especialmente quando machos competem por fêmeas. Parte do conflito inerente a um bando maior foi mitigada nos humanos por uma tendência cultural à monogamia e à estratificação social. Machos “superiores” supostamente praticavam a poliginia dentro do bando, como ainda hoje se vê entre tribos primitivas e algumas culturas modernas (como a islâmica). Mas, na maior parte dos casos, a monogamia se tornou um meio de amenizar os conflitos, e o casamento acabou se tornando uma estratégia para cimentar conexões entre famílias que, de outra forma, poderiam competir entre si.

Uma vez que o casamento era um contrato social, sua dissolução geralmente criava dificuldades consideráveis e era desestimulada. Regras para evitar o incesto foram desenvolvidas e postas em prática na maioria das sociedades humanas, supostamente para diminuir o conflito no seio da família e para variar o *pool* genético.

Umas poucas culturas têm praticado a poliandria (na qual uma mulher tem vários maridos), mas muito mais frequentemente a família do noivo precisavam pagar pelas noivas, porque elas eram um acréscimo importante na força de trabalho da família do noivo. Diferenças marcantes na estrutura social, especialmente no que diz respeito à liberdade sexual e no papel das mulheres, são encontradas entre as milhares de sociedades humanas atuais.

Ao longo de toda a linhagem dos hominídeos, a família tem sido o alicerce da estrutura do grupo. Entre os caçadores-coletores modernos, usualmente vemos uma divisão de trabalho entre homens e mulheres, sendo os homens em geral os caçadores (que fornecem proteínas e gordura à dieta) e as mulheres as coletoras (que fornecem carboidratos e alguma proteína, na forma de frutos secos). Os dois sexos, assim, formam uma unidade cooperativa. No entanto, não há coesão apenas dentro da família nuclear (marido, mulher e filhos), mas também entre os membros da família estendida (avós, irmãos, primos, tios e tias). A família estendida é importante não só para a ajuda mútua como também para a coesão cultural e a transmissão da cultura para as gerações seguintes. A ruptura da família estendida e mesmo da família nuclear é uma das raízes da ruptura cultural que acontece nas favelas e nos cortiços.

À medida que o tamanho do grupo aumentava, a divisão de trabalho e a especialização se tornavam mais importantes, contribuindo ainda mais para a estratificação social. O feudalismo é o exemplo mais extremo disso. A especialização permitiu aos humanos ocupar coletivamente nichos ecológicos cada vez mais variados. Enquanto a maioria das outras espécies ocupava um nicho único, os humanos ocupam vários.

Com efeito, se reconhecermos a existência de zonas adaptativas, como Simpson e Huxley reconheciam, então os seres humanos ocupam uma zona adaptativa inteira sozinhos. E, se sentimos que a diferença na ocupação de uma zona adaptativa se correlaciona com

a distinção taxonômica, então Huxley não estava inteiramente errado ao estabelecer um reino separado (o Psychozoa) para os humanos, apesar da nossa semelhança genética com os chimpanzés.

O nascimento da civilização

Um momento importante na pontuação da evolução da cultura humana parece ter ocorrido durante a transição do estágio de caçador-coletor para o da agricultura e da criação de animais domésticos. Isso aconteceu há meros 10 mil anos, mas mesmo assim teve um efeito mais dramático sobre a espécie humana do que qualquer coisa que tenha acontecido nos milhões de anos anteriores de hominização. Foi o começo da civilização.

Assentamentos permanentes foram estabelecidos há cerca de 10 mil anos, alguns deles grandes o bastante para serem chamados de cidades pelos arqueólogos. Esses assentamentos estimularam mais ainda a divisão do trabalho e aceleraram o progresso tecnológico e — especialmente neste século — médico. As cidades permitiram o comércio e a exploração de recursos naturais não renováveis, e, mais do que tudo, elas provocaram a intensificação da agricultura, levando a um crescimento populacional rápido.

Através dessas diversas conquistas culturais, os humanos tiveram sucesso em se tornar independentes do ambiente. Hoje podemos viver do Ártico à Antártida, dos trópicos mais úmidos até as margens dos desertos. Casas, vestimentas, transporte e todo tipo de máquinas permitiram que nos emancipássemos dos climas locais e da especialização ecológica à qual todos os outros organismos estão sujeitos. Por todas essas razões, a explosão na população humana ainda não foi atingida pela previsão de Malthus. No entanto, esse sucesso adaptativo ocorreu à custa de uma exploração em grande parte irreversível dos recursos naturais e da destruição dos ecossistemas.

A divisão dos humanos modernos em raças e o status biológico dessas raças têm sido alvo de controvérsia desde Blumenbach. Nos tempos da escravidão, a visão confortável disseminada entre os brancos era que brancos, negros e mongolóides asiáticos eram três espécies diferentes. Essa visão foi totalmente abandonada, mas o número de raças humanas reconhecidas por diferentes autores — que vai de cinco a mais de cinquenta — sugere que a discussão em torno do significado de “raça” ainda não foi resolvida.

O pensamento tipológico nunca foi esclarecedor no estudo da vida, mas o âmbito em que ele se mostrou mais deletério foi na consideração das raças humanas. Pesquisas moleculares modernas revelaram que as chamadas raças humanas são muito próximas umas das outras e são simplesmente populações variáveis. Elas em geral diferem umas das outras nos valores médios de várias características físicas, mentais e comportamentais, mas há uma sobreposição grande nas suas curvas de variação.

Sem dúvida alguma, características raciais definidas existem. Quanto mais tempo duas raças estiverem separadas, maiores serão suas diferenças genéticas. As populações de uma raça são mais parecidas entre si do que o são as próprias raças.¹⁰ Ninguém confundiria um africano subsaariano com um europeu ocidental ou com um asiático do leste com base em aspectos físicos superficiais, como cor da pele, cor dos olhos, cabelo, formato do nariz e dos lábios, forma do crânio e estatura. A genética e a biologia molecular acrescentaram várias outras diferenças médias ou caracteres diagnósticos. Mas, quando se trata das características psicológicas que realmente contam, o papel dos genes é em grande parte indeterminado.

A maioria das características verdadeiramente cruciais atribuídas às raças humanas não tem nada a ver com seus genótipos, mas são propriedades étnicas e culturais. Das raças, diz-se que são ami-

gáveis, cruéis, inteligentes, estúpidas, confiáveis, traiçoeiras, laboriosas, preguiçosas, desconfiadas, preconceituosas, emotivas, frias e não sei mais o quê. Com efeito, quase qualquer atributo que as pessoas possam ter já foi considerado uma característica de uma ou outra raça humana. Desconheço qualquer confirmação científica dessas alegações, embora seja verdade que certas populações humanas têm características culturais bem definidas — por exemplo, os puritanos da Nova Inglaterra, os ciganos na Europa e as populações negras dos guetos nas cidades americanas. Nesse campo, fatos confiáveis são difíceis de estabelecer, uma vez que o estudo científico das diferenças biológicas entre as raças sempre é recebido com um franzir de cenho, como um caminho para o racismo.

Às vezes se pergunta que chance existe de a espécie humana se dividir em várias espécies. A resposta é: nenhuma. Os humanos ocupam todos os nichos concebíveis que um animal como o homem poderia ocupar, do Ártico aos trópicos. Sempre que raças geograficamente isoladas surgiram nos últimos 100 mil anos, elas prontamente se misturaram com outras raças tão logo o contato era restabelecido. Há contato demais entre todas as populações humanas hoje para que ocorra qualquer tipo de isolamento de longo prazo que possa levar à especiação.

Então, pergunta-se às vezes, os humanos existentes hoje poderiam evoluir para se tornar uma espécie melhor? Poderia o homem se tornar um Super-Homem? Novamente, não há razão para ter esperanças aqui. É claro que existe uma variação genética abundante no genótipo humano, mas as condições modernas são muito diferentes daquelas sob as quais algumas populações de *Homo erectus* evoluíram até o *Homo sapiens*. Naquela época, nossa estrutura populacional era a dos pequenos bandos, e em cada um deles havia uma forte seleção natural que colocava um prêmio nas características que viriam a resultar no *Homo sapiens*. Além disso, como na maioria dos animais sociais, sem dúvida havia seleção de grupo.

Os humanos modernos, por outro lado, formam uma sociedade de massa, e não há nenhuma indicação de seleção natural para genótipos superiores que permitiriam que a espécie humana se elevasse acima das suas capacidades atuais. Com efeito, muitos autores argumentam que estamos vivendo uma deterioração do *pool* genético humano. Levando em conta a alta variabilidade do *pool* genético humano, a deterioração genética não é um perigo imediato. Muito mais assustadora e ameaçadora do futuro da humanidade é a deterioração do sistema de valores da maioria das sociedades humanas (ver o capítulo 12).

Mas que tal a seleção artificial para um genótipo superior? Galton, primo de Darwin, foi o primeiro a sugerir que, através de uma seleção apropriada, poderíamos e deveríamos melhorar a humanidade mais ainda. Ele cunhou o termo “eugenia”. Pessoas de todas as faixas do espectro político, da extrema direita à extrema esquerda, endossaram a idéia a princípio, concebendo a eugenia como uma forma de conduzir a humanidade a uma perfeição cada vez maior. É tristemente irônico que esse nobre objetivo inicial tenha levado aos crimes mais hediondos que a humanidade já viu. Quanto interpretado tipologicamente, ele conduziu ao racismo e, por fim, aos horrores de Hitler.

Apenas medidas eugênicas poderiam provocar um “aperfeiçoamento” genético drástico na raça humana, mas isso é impossível por várias razões. Primeiro, não conhecemos a base genética das características não-físicas dos humanos atuais e futuros que desejamos manipular. Segundo, de modo a ser bem-sucedida e equilibrada, a sociedade humana precisa consistir em uma mistura de muitos genótipos diferentes, mas ninguém tem idéia de qual seria o tipo “certo” de mistura, ou como selecioná-lo. Por último, e o mais importante, os passos que precisariam ser dados para implementar a eugenia são simplesmente intoleráveis em uma democracia.¹¹

O sentido da igualdade humana

Não existem dois indivíduos iguais. Isso vale tanto para a população humana quanto para todos os outros organismos que se reproduzem sexualmente. Cada indivíduo é uma combinação única de características morfológicas, fisiológicas e psicológicas e dos fatores genéticos que contribuem para moldar essas características. Não restam dúvidas sobre a grande plasticidade do fenótipo humano, especialmente no que diz respeito a características comportamentais, mas os genes também dão uma contribuição importante ao comportamento e à personalidade humana. Algumas pessoas são desastradas congênitas; outras têm uma destreza manual fantástica. Algumas pessoas definitivamente têm talento matemático; outras são desprovidas dele, em maior ou menor grau. A habilidade musical há muito foi reconhecida como algo que tem um grande componente inato.

Com efeito, são poucas as características humanas que não têm um grau grande de variação (polimorfismo) em todas as populações humanas. É exatamente essa diversidade que forma a base de uma sociedade saudável. Ela permite uma divisão do trabalho, mas também exige um sistema social que possibilite a cada pessoa encontrar o nicho na sociedade no qual ela se encaixe melhor.¹²

A maioria das pessoas favorece a igualdade e concorda que igualdade significa um status igual diante da lei e oportunidades iguais. Mas igualdade não significa identidade total. A igualdade é um conceito social e ético, não biológico. Ignorar a diversidade biológica humana em nome da igualdade só faz mal; isso tem sido um impedimento à educação, à medicina e a vários outros esforços humanos.

Uma grande sensibilidade e um alto senso de justiça são necessários na aplicação do princípio da igualdade em face de toda a diversidade biológica humana. Como Haldane (1949) afirmou tão corretamente: “É geralmente aceito que a liberdade demanda

igualdade de oportunidades. Não é igualmente considerado que ela também demanda uma variedade de oportunidades e uma tolerância com aqueles que falham em se adequar aos padrões que podem ser culturalmente desejáveis, mas que não são essenciais ao funcionamento da sociedade”.

12. Pode a evolução explicar a ética?

Talvez nenhuma outra área de interesse humano tenha sido mais abalada pela revolução darwinista que a teoria da moral humana. Antes de Darwin, a resposta tradicional à pergunta “Qual é a fonte da moral humana?” era que ela era dada por Deus. É claro, filósofos proeminentes, de Aristóteles a Spinoza e Kant, haviam pensado nas questões relacionadas “Qual é a natureza da moral humana?” e “Qual é a moral mais apropriada para os seres humanos?”. Darwin não desafiou as conclusões dos filósofos sobre essas questões mais profundas. O que ele fez foi invalidar a afirmação de que a moral era algo concedido por Deus.

Para isso, usou dois argumentos. Primeiro, sua teoria da origem comum privou o homem do lugar especial na natureza que lhe havia sido reservado não só pelas religiões monoteístas como também pelos filósofos. Não obstante, Darwin concordava que, no que diz respeito à moralidade, há uma diferença fundamental entre humanos e animais. “Eu partilho inteiramente o julgamento dos autores que sustentam que, de todas as diferenças entre o Homem e os animais inferiores, o senso moral ou consciência é a

mais importante” (1871: 70). Ainda assim, uma vez que os humanos tiveram ancestrais animais, essa diferença agora precisava ser explicada em termos evolutivos. Admitir qualquer diferença descontínua entre os humanos e os outros animais teria significado uma saltação, e Darwin se opunha ferrenhamente a tal processo. Ele, o paladino do gradualismo, insistia em que todas as coisas, até a moral humana, deveriam ter evoluído gradualmente. Evidentemente, Darwin avaliava que um longo tempo transcorreu (tempo este hoje estimado em pelo menos 5 milhões de anos) desde que os humanos se ramificaram da linhagem dos chimpanzés, e esse intervalo deu aos humanos tempo o bastante para passar gradualmente por todos os estágios do desenvolvimento ético.

Em segundo lugar, sua teoria da seleção natural eliminou todas as forças sobrenaturais do funcionamento da natureza e implicitamente refutou a suposição da teologia natural de que tudo no universo, inclusive a moral humana, havia sido projetado por Deus e era governado por Suas leis. Depois de Darwin, os filósofos tiveram a tarefa formidável de substituir uma explicação sobrenatural da moralidade humana por uma natural. Grande parte da literatura sobre a relação entre a ética e a evolução nos últimos 130 anos tem sido dedicada à busca de uma “ética naturalista”, e vários volumes sobre esse tema aparecem anualmente, 125 anos depois que Darwin levantou a questão pela primeira vez, em 1871.

Alguns desses autores chegaram a expressar a esperança de que o estudo da evolução nos desse não apenas pistas sobre as origens da moral humana, mas também *fixassem* um conjunto de normas éticas. Evolucionistas proeminentes adotaram uma proposição mais modesta: segundo eles, a seleção natural, dirigida ao alvo apropriado, acabaria levando a uma ética humana na qual o altruísmo e a consideração pelo bem comum desempenhariam um papel de destaque. Os eticistas insistem, corretamente, em que a ciência em geral e a biologia evolutiva em particular não foram construídas

para fornecer um conjunto de normas éticas específicas. Mas é importante acrescentar que uma ética verdadeiramente biológica, que leva a evolução cultural humana tão em conta quanto o programa genético, seria internamente muito mais consistente do que os sistemas éticos que ignorarem esses fatores. Tal sistema biologicamente informado não deriva da evolução, mas é compatível com ela.

Tradicionalmente, a ética tem sido uma área de conflito entre a ciência e a filosofia. A ética envolve valores, e os cientistas, dizem os filósofos, deveriam se ater aos fatos e deixar que a filosofia estabelecesse e analisasse os valores. Mas os cientistas ressaltam que novos conhecimentos científicos sobre as consequências das ações humanas levam inevitavelmente a considerações éticas. Os problemas atuais da explosão populacional, do aumento do dióxido de carbono na atmosfera e da destruição das florestas tropicais são apenas alguns exemplos. Os cientistas sentem que é dever deles chamar a atenção para tais situações e elaborar propostas sobre como corrigi-las. Isso inevitavelmente leva a juízos de valor. Muito freqüentemente nosso conhecimento dos processos da evolução, assim como de outros dados científicos, nos torna capazes de fazer as escolhas mais eticamente apropriadas quando várias opções de ação estão disponíveis.

A ORIGEM DA ÉTICA HUMANA

Se a seleção natural só recompensa o auto-interesse, portanto o egocentrismo de cada indivíduo, como poderia surgir uma ética baseada no altruísmo e em um senso de responsabilidade pelo bem-estar da comunidade como um todo? O ensaio *Evolution and ethics*, de T. H. Huxley (1893) foi a fonte de muita confusão sobre esse assunto. Huxley, que acreditava nas causas finais, rejeitava a seleção natural e não representava o pensamento darwinista legíti-

timo. A seleção natural, como ele a concebia, só operava no indivíduo, e isso o levou a conclusões que para ele refutavam qualquer contribuição construtiva da seleção natural para um bem maior. É lamentável, considerando quão confuso era o ensaio de Huxley, que mesmo hoje as pessoas se refiram a ele como um texto de peso sobre o tema.

Mas Huxley estava certo ao perceber de algum modo que o auto-interesse do indivíduo estava em conflito com o bem-estar da sociedade. O principal problema de qualquer ética naturalista humana é resolver o enigma da existência de comportamentos altruístas entre indivíduos basicamente egoístas. Especialmente desafiador para um darwinista é o problema de quanto a seleção natural poderia ter contribuído para o altruísmo. Afinal, ela não premia sempre os indivíduos que são completamente egoístas?

O longo e acirrado debate dos últimos trinta anos revelou que, quando os autores usam o termo “altruísta”, eles em geral querem dizer coisas diferentes. Claramente, a palavra sempre significa ajudar uma outra pessoa. Mas isso precisa acontecer sempre em detrimento do altruísta? Se um animal emite chamados de alarme para informar aos membros do grupo sobre a chegada de um predador, ele decerto se coloca em perigo ao atrair a atenção do predador. Um ato altruísta é usualmente definido como aquele “que beneficia um outro organismo a um custo para o ator, em que custo e benefício são definidos em termos de sucesso reprodutivo” (Trivers, 1985).

Mas o altruísmo, como é usado na linguagem do dia-a-dia, não precisa sempre incluir perigo ou qualquer outro tipo de desvantagem. O filósofo Augusto Comte cunhou o termo com o sentido da preocupação com o bem-estar dos outros. Por exemplo, se durante uma caminhada ajudo uma senhora que caiu, realizo um ato altruísta sem prejuízo nenhum para mim mesmo. O meu “custo” seria, no máximo, perder um minuto do meu tempo. Nós

todos conhecemos pessoas generosas e de coração mole que se sentem bem ao praticar boas ações de qualquer natureza. Por acaso essas boas ações, que não envolvem nenhum custo, não são também altruístas? Seria o pequeno esforço investido em uma boa ação por acaso um “custo” significativo?

Argumento que restringir o altruísmo a casos que envolvem perigo potencial ou dano ao altruísta não representa o uso normal do termo. Ao tentarmos determinar quanto a seleção natural poderia ter favorecido o surgimento do altruísmo, é importante distinguir entre esses vários tipos de comportamento.

Darwin já havia enxergado parte da resposta, mas apenas nos últimos anos os estudiosos chegaram a compreender inteiramente que uma pessoa é alvo de seleção em três contextos diferentes: como indivíduo, membro de uma família (ou, mais corretamente, como reprodutor) e como membro de um grupo social. No caso do indivíduo enquanto alvo de seleção, apenas tendências egoístas serão recompensadas, como bem notou Huxley. Mas, nos outros dois contextos, a seleção pode favorecer uma preocupação com os outros membros do grupo, ou seja, o altruísmo. Os dilemas éticos tão freqüentemente observados no comportamento humano não podem ser compreendidos sem levar em consideração esse contexto de três lados.

Altruísmo de aptidão inclusiva

Uma forma particular de altruísmo bastante disseminada nos animais, primariamente nas espécies com cuidado parental ou as que formam grupos sociais que consistem sobretudo de famílias estendidas, é o chamado altruísmo de aptidão inclusiva. Ele envolve a defesa das crias pela mãe e às vezes pelo pai, uma tendência a proteger outros parentes próximos ou avisá-los do perigo, uma disposição para dividir comida com eles e outros tipos de

comportamentos evidentemente benéficos ao recipiente, mas, ao menos potencialmente, danosos ao ator.

Como afirmaram Haldane, Hamilton e vários sociobiólogos, esses comportamentos serão freqüentemente favorecidos pela seleção natural, porque aumentam a aptidão inclusiva do genótipo compartilhado pelo altruísta com os beneficiários do comportamento, a saber, a sua prole e os seus parentes próximos. Tal comportamento aumenta a aptidão inclusiva do altruísta, como se diz. Sempre que o *pool* genético da geração seguinte é afetado dessa forma pela contribuição de alguns animais para a sobrevivência de seus parentes próximos, esse processo é chamado de seleção por parentesco.

O cuidado parental é o exemplo mais claro do tipo de altruísmo que aumenta a aptidão inclusiva. Conquanto o comportamento resulte em um benefício geral para o genótipo do altruísta, ele é, estritamente falando, um comportamento egoísta e não altruísta. A literatura sociobiológica contém literalmente centenas de casos de atos aparentemente altruístas que, na verdade, aumentam a aptidão inclusiva e portanto são, em última análise, egoístas do “ponto de vista” do genótipo.

O altruísmo de aptidão inclusiva é um dos principais temas da discórdia da literatura evolucionista atual. Alguns autores parecem pensar que toda a ética humana se resume mais ou menos ao altruísmo de aptidão inclusiva nu e cru. Outros acham que, quando a ética verdadeira evoluiu, ela substituiu totalmente o altruísmo de aptidão inclusiva. Minha própria posição é intermediária. Consigo distinguir muitos resquícios de comportamento altruísta de aptidão inclusiva em seres humanos, como o amor instintivo de uma mãe por seus filhos e as distintas atitudes morais que tendemos a tomar quando lidamos com estranhos, em comparação com membros do nosso próprio grupo. A maioria das normas morais descritas no Velho Testamento são características

desse legado. No entanto, me parece que o altruísmo de aptidão inclusiva é apenas uma pequena porção da ética humana atual, consistindo primariamente no amor dos pais pelos filhos.

Darwin tinha plena ciência da existência da aptidão inclusiva. Ao falar sobre a morte em sacrifício de homens com faculdades superiores em uma tribo, ele enunciou (1871: 161): “Se tais homens deixassem filhos para herdar sua superioridade mental, a chance de que nascessem membros ainda mais engenhosos na tribo seriam algo maiores e, numa tribo muito pequena, decididamente maiores. Mesmo que eles não tivessem filhos, a tribo ainda incluiria seus parentes consangüíneos”, os quais, como Darwin explicou, têm uma dotação genética semelhante.

As pressões de seleção que levam à disseminação do altruísmo de aptidão inclusiva não ocorrem somente em povos primitivos, mas também em todos os animais nos quais as famílias estendidas sejam o núcleo dos grupos sociais. Que os animais sociais têm uma habilidade notável para reconhecer e favorecer seus parentes é algo que Darwin enfatizou muitas vezes: “Os instintos sociais nunca se estendem a todos os indivíduos da mesma espécie” (1871: 85). Quão desenvolvida é essa percepção do parentesco é algo que foi documentado experimentalmente por Pat Bateson (1983) de forma notável.

Altruísmo recíproco

Animais solitários, como os leopardos, têm menos oportunidades que os animais sociais de adquirir aptidão inclusiva. Nos animais solitários, esta é mais restrita ao comportamento da mãe em relação a seus filhotes. A única aparente exceção à conclusão de que indivíduos solitários não são altruístas em relação a ninguém exceto a sua prole é o caso do altruísmo recíproco, uma interação mutuamente benéfica entre indivíduos não relacionados. Os pei-

xes limpadores que livram os grandes peixes predadores de parasitas externos são um exemplo típico. Uma aliança entre dois indivíduos numa luta contra um terceiro indivíduo é outro.

Na verdade, o termo altruísmo é usado aqui em um sentido amplo, porque o suposto altruísta sempre se beneficia de uma vez ou espera ser beneficiado no futuro. Tais interações recíprocas, particularmente entre os primatas, sempre implicam um raciocínio do tipo: “Se eu ajudar esse indivíduo numa briga, ele vai me ajudar quando eu entrar em uma”. Em outras palavras, tal comportamento é basicamente egoísta, e não altruísta.

O altruísmo recíproco consiste simplesmente em benefícios ou trocas recíprocas de favores. No entanto, esses benefícios às vezes são sutis, como quando um filantropo recebe a aprovação, o respeito e a admiração de seus concidadãos em troca de doações para caridade, ou quando um cientista recebe um prêmio Nobel, Balzan, Japão, Crafoord ou Wolff por suas destacadas contribuições ao seu campo. Recompensar conquistas individuais que beneficiam o grupo maior a longo prazo é muito importante para o melhoramento da nossa sociedade. Aceitamos como completamente certa a recompensa por uma conquista nos esportes — somente os atletas de destaque ganham medalhas olímpicas. Mas deveríamos lembrar que todas as grandes conquistas da humanidade foram feitas por bem menos de 1% da população humana total. Sem recompensas ou reconhecimento por realizações notáveis, nossa sociedade logo se desintegraria, como aconteceu com aquelas sociedades marxistas que eram organizadas em torno do princípio da compensação igual para todos.

Mas nem todo comportamento altruísta leva a uma recompensa. Certamente conhecemos casos de atos altruístas nos quais o altruísta não espera, e de fato não quer, nenhum tipo de recompensa. Tem-se afirmado que o altruísmo recíproco, se praticado regularmente, pode facilitar atos de altruísmo puro, nos quais não

se espera nenhuma reciprocidade para o indivíduo ou para seus parentes mais próximos. Assim, o altruísmo recíproco em nossos antepassados pré-humanos pode ser uma das raízes da moralidade humana.

A emergência do altruísmo genuíno

Além do altruísmo de aptidão inclusiva e do altruísmo recíproco, ambos evoluídos por meio da pressão de seleção sobre um indivíduo, uma fonte muito mais importante da ética humana consiste nas normas e nos comportamentos éticos que evoluíram através de uma pressão de seleção sobre grupos culturais humanos. Uma seleção de grupo forte aconteceu durante toda a história dos hominídeos, como Darwin bem sabia.¹ Diferentemente da seleção individual, a seleção de grupo pode recompensar o altruísmo verdadeiro e quaisquer outras virtudes que fortaleçam o grupo, mesmo à custa do indivíduo. Como a história mostrou repetidas vezes, os comportamentos a serem preservados e as normas de comportamento destinadas a ter maior longevidade serão aqueles que mais contribuirão com o bem-estar do grupo cultural como um todo. Em outras palavras, o comportamento ético em humanos é adaptativo.²

A maioria das associações entre animais (grupos) não pode servir como alvo de seleção. As exceções são os chamados animais sociais, que praticam constantemente a cooperação. É claro, nem todos os agregados de animais são grupos sociais. Por exemplo, cardumes de peixes ou as imensas manadas de ungulados africanos não se encaixam nessa categoria.

A espécie humana oferece uma ilustração de animais sociais por excelência. Os primeiros grupos de hominídeos — ampliações da família original — eram simplesmente uma continuação da estrutura do bando encontrada entre os primatas sociais. As

fêmeas jovens ou os machos jovens provavelmente deixavam o bando e se juntavam um ao outro, mas no restante o comportamento do grupo refletia o altruísmo de aptidão inclusiva. Para que uma família estendida ou um pequeno bando evoluíssem em uma sociedade maior e mais aberta, o altruísmo antes reservado aos parentes mais próximos precisou ser estendido a quem não era parente. Vemos rudimentos desse comportamento genuinamente altruísta em outros grupos de primatas — nos babuínos, por exemplo —, nos quais acontecem trocas entre indivíduos sem relação de parentesco.³

Ao longo da evolução humana, alguns hominídeos individuais devem ter descoberto que um bando ampliado tinha mais chances de sair vitorioso de um encontro com outro bando do que um grupo pequeno, que consistisse apenas em uma família estendida. Talvez um bando de posse de uma caverna especialmente desejável, ou um poço ou um território bom para caça atraísse forasteiros desejosos de se beneficiar dessas vantagens. Era uma vantagem seletiva para o bando se fortalecer com essa mão-de-obra adicional, mesmo que aumentar o grupo exigisse que a preocupação com o bem-estar dos outros se estendesse também para os parentes distantes ou para indivíduos sem relação de parentesco, ou seja, além do alcance da aptidão inclusiva. Por fim, foram estabelecidas normas culturais de comportamento para contrabalançar as tendências egoístas básicas dos indivíduos do bando e para lhes impor as limitações de um altruísmo que beneficia diretamente o grupo como um todo. Em última instância, a maioria dos indivíduos, cujo bem-estar está ligado diretamente ao bem-estar do grupo, também se beneficia, embora, é claro, isso não aconteça com alguns (como no caso de mortes durante uma guerra).

A capacidade de aplicar normas grupais adequadamente exigiu, por sua vez, a evoluída capacidade de raciocínio do cérebro humano. A coevolução entre um cérebro maior e um grupo social

maior tornou possíveis dois aspectos do comportamento ético: (1) A seleção natural, trabalhando através da seleção de grupo, poderia recompensar alguns traços não-egoístas que favorecessem o grupo, até alguns que fossem prejudiciais ao indivíduo. (2) Os humanos, com seu novo poder de raciocínio, poderiam escolher deliberadamente o comportamento ético em vez do egoísmo, livrando-se da aptidão inclusiva puramente instintiva. O comportamento ético é baseado em pensamento consciente, que leva a escolhas deliberadas. O comportamento altruísta de uma mãe pássaro não é baseado em escolhas: ele é instintivo, não ético. Como Simpson (1969: 143) caracterizou a situação, “o homem é o único organismo ético no sentido completo da palavra, e não há ética relevante exceto a ética humana”. A transição adaptativa de um altruísmo instintivo baseado em aptidão inclusiva para uma ética de grupo baseada em tomada de decisão talvez tenha sido o passo mais importante da humanização.

De forma a ser caracterizado como ético, um comportamento precisa atender aos seguintes pré-requisitos, de acordo com Simpson (1969): (1) é preciso haver modos alternativos de ação; (2) a pessoa deve ser capaz de julgar as alternativas em termos éticos; (3) a pessoa deve ser livre para escolher o que ela julga ser eticamente bom. Assim, o comportamento ético claramente depende da capacidade do indivíduo de antever os resultados das suas ações, e também de sua disposição em assumir a responsabilidade individual pelos resultados dessas ações. Essa é a base para a origem e a função do sentido da moral.

Ayala (1987) expressou mais ou menos o mesmo pensamento quando disse que os humanos manifestam comportamentos éticos porque sua constituição biológica determina a presença neles das três condições necessárias e conjuntamente suficientes para o comportamento ético. Essas condições são: (1) a capacidade de antecipar as consequências das próprias ações; (2) a capacidade de fazer

julgamentos; (3) a capacidade de escolher entre caminhos alternativos de ação.

A diferença entre um animal, que age instintivamente, e um ser humano, que tem a capacidade de fazer escolhas, é a linha divisória da ética. Os sentimentos de culpa, consciência pesada, remorso e medo, ou de simpatia e gratificação que geralmente acompanham a execução de ações sujeitas a avaliação moral documentam a natureza consciente do comportamento antiético ou ético dos seres humanos. A capacidade de se comportar eticamente é, portanto, correlacionada com a evolução de outras características humanas, como a grande extensão do período da infância e juventude — e, portanto, do cuidado parental —, uma tendência ao aumento do bando nos hominídeos para além da família estendida e o desenvolvimento das tradições tribais na cultura (ver o capítulo 10). No geral, é impossível determinar o que é causa e o que é efeito nesses desdobramentos correlacionados.

COMO UM GRUPO CULTURAL ADQUIRE SUAS NORMAS ÉTICAS PRÓPRIAS?

Essa questão tem sido debatida pelos filósofos desde Aristóteles, Spinoza e Kant até os tempos modernos. As duas respostas pré-darwinistas mais amplamente adotadas eram que as normas morais foram dadas por Deus ou eram produto apenas da razão humana (que era, ela própria, dada por Deus).

O próprio Darwin se perguntava se somente aquelas ações que resultavam de deliberação cuidadosa — ou seja, do uso da razão — poderiam ser chamadas de morais ou éticas, ou se atos corajosos ou de caridade realizados impulsiva ou “instintivamente” também deveriam ser considerados atos morais. Ele tendia a considerar a participação da deliberação um aspecto importante

da moralidade, como quando definiu um ser moral como alguém “que é capaz de comparar seus atos ou motivos pretéritos e futuros e de aprová-los ou desaprová-los”. No entanto, ele também considerava atos éticos uma resposta quase instintiva a um “instinto social” encontrado em todos os animais sociais. Tal solução simplesmente levou à questão seguinte: Como e por que esse instinto social evoluiu?

Bertrand Russell tinha uma idéia parecida, mas articulou-a de forma mais concisa. Ele considerava “objetivamente certo [...] [aquilo que] serve melhor ao interesse do grupo. Uma comparação entre normas éticas ao redor do mundo mostra que os grupos mais bem-sucedidos foram aqueles nos quais o auto-interesse do indivíduo esteve pelo menos em alguma medida subordinado ao bem-estar da comunidade”. O enunciado de Russell chega mais perto de dar uma resposta satisfatória do que o de Darwin, porque ele se refere ao sucesso relativo de diferentes grupos culturais humanos. Alguns tinham normas morais que aumentavam a probabilidade de sucesso — ou seja, a longevidade — do grupo; outros tinham normas morais mal-adaptativas, que levaram à sua rápida extinção.

É fácil imaginar um cenário no qual o sistema particular de valores de um grupo cultural possa levar à sua prosperidade e aumento numérico, e isso, por sua vez, conduza a guerras genocidas contra os seus vizinhos, com o vitorioso tomando o território dos derrotados. Em tal cenário, o altruísmo intragrupo e outros comportamentos que fortaleçam o grupo em relação a outros grupos seriam recompensados pela seleção no decorrer do tempo, e quaisquer tendências divisórias dentro de um grupo o enfraqueceriam, levando-o à extinção. Assim, o sistema ético de cada grupo social seria modificado continuamente por tentativa e erro, sucesso e fracasso, bem como pela ocasional influência modificadora de algumas lideranças.

O que é moral e o que é melhor para um grupo pode depender de circunstâncias temporárias. Wilson (1975) nos lembra das modificações no sistema de valores dos irlandeses durante a Grande Fome (1846-48) e dos japoneses durante a ocupação americana pós-Segunda Guerra Mundial. As grandes diferenças entre as tribos no que diz respeito ao infanticídio, à permissividade sexual, aos direitos de propriedade e à agressividade documentam a plasticidade das normas éticas culturais. Com efeito, poderia ser uma desvantagem se todas as sociedades humanas tivessem as mesmas regras. Uma taxa de natalidade alta é ética em uma tribo primitiva com alta taxa de mortalidade infantil; por outro lado, uma restrição a um ou dois filhos é de grande benefício não somente para o grupo como um todo, mas até para a família individual em um país superpopuloso. Em uma sociedade rural, pode ser benéfico que as famílias estendidas vivam juntas, mas isso pode levar a brigas intermináveis em condições urbanas.

O patamar ocupado por dada regra ética também varia de uma cultura para outra. O nível baixo que os direitos humanos ocupam no atual governo chinês é um exemplo disso. Nossos negociadores americanos, que parecem aceitar sem questionamento que o mundo inteiro tem apenas uma escala de valores éticos, são incapazes de entender a atitude chinesa. Parte da doutrinação moral dos jovens consiste em ensinar-lhes a hierarquia das regras na sua própria cultura.

Os filósofos ocidentais tentaram superar essa aparente relatividade ética ao propor várias réguas para hierarquizar os valores. A Regra de Ouro é uma dessas réguas. A sugestão utilitária de que a norma deveria ser julgada pelo seu grau de contribuição ao maior bem possível para o maior número possível de pessoas é outra. A sinceridade há muito tem sido aceita como um valor a ser destacado, e a justiça é claramente uma norma ética de alto nível no Ocidente, embora ninguém pareça capaz de concordar sobre o que é justo e o

que é certo. Nos últimos anos, tem-se dito que as atitudes que dão sentido à vida individual devem ser colocadas num patamar elevado.

Muito do que é considerado moral depende do tamanho do grupo ao qual se está associado. Nas sociedades primitivas há aparentemente um tamanho ótimo para os grupos sociais. Isso foi observado em tribos de índios da América do Sul e em alguns animais sociais. Quando um grupo é pequeno demais, por outro lado, ele se torna vulnerável a ataques de competidores. Com o surgimento da agricultura, de 10 mil a 15 mil anos atrás, um aumento no tamanho do grupo além do da tribo primitiva foi favorecido: a disponibilidade de um bom estoque de alimentos permitia o crescimento da população, e um grupo maior seria capaz de se proteger melhor de malfeitores. Mas, à medida que o tamanho do grupo aumentava, novos conflitos éticos surgiam. Uma mudança nos valores — por exemplo, maior ênfase nos direitos de propriedade — era inevitável.

À medida que o tamanho dos grupos culturais humanos aumentou, especialmente depois da urbanização e da origem dos Estados, estratos sociais diferentes se desenvolveram dentro das sociedades individuais, cada um deles com um conjunto mais ou menos distinto de idéias éticas. Até que ponto isso foi inevitável e talvez até desejável é algo que pode ser discutido. Quando isso criou desigualdades brutais, como na maioria das sociedades feudais, cedo ou tarde levou à revolução. A luta pela democracia e pelo princípio da igualdade no Ocidente foi uma reação às desigualdades sociais da era anterior.

Em algumas sociedades, os valores dos indivíduos de todo o grupo são homogêneos, enquanto em outras alguns subgrupos diferem em suas normas morais. As discordâncias sobre o aborto, os direitos dos homossexuais e dos doentes terminais e a pena de morte ilustram o dissenso que existe na sociedade americana, que é eticamente bastante diversificada.

O que podemos então concluir sobre como cada cultura adquire suas regras morais? São elas o produto da razão humana ou simplesmente o resultado da sobrevivência aleatória dos grupos com o sistema ético mais adaptativo? A enorme variedade das regras morais das tribos humanas primitivas indicaria que muitas das diferenças se devem simplesmente ao acaso. Mas, quando comparamos as principais religiões e filosofias, incluindo as da China e da Índia, descobrimos que seus códigos de ética são notavelmente parecidos, apesar de suas histórias em grande parte independentes. Isso sugere que os filósofos, profetas ou legisladores responsáveis por esses códigos devem ter estudado cuidadosamente as suas respectivas sociedades e, usando sua capacidade de raciocinar a partir dessas observações, devem ter decidido quais regras eram benéficas e quais não eram. As regras proclamadas por Moisés, ou por Jesus Cristo no Sermão da Montanha, eram certamente produto da razão. Uma vez adotadas, se tornaram parte da tradição cultural e foram transmitidas culturalmente de uma geração a outra.

Segundo alguns autores, todo ato ético humano é exclusivamente consequência de uma análise racional de custo-benefício. Para outros, trata-se de uma resposta a uma disposição quase instintiva, que Darwin chamou de “instinto social”. Na minha opinião, a resposta correta está em algum lugar no meio. Obviamente, não desenvolvemos uma norma moral especial para cada dilema ético. Na maioria das vezes, tomamos nossa decisão ao aplicar automaticamente as regras tradicionais da nossa cultura. Somente quando há conflito entre várias regras é que fazemos uma análise racional.

Mas como um indivíduo em dada cultura adquire essas regras tradicionais? Quais são os papéis respectivos de “natureza e criação” no desenvolvimento desse senso moral?

Depois da ascensão da genética neste século, a questão “O senso moral é inato ou adquirido?” passou a ter uma proeminência cada vez maior. Os behavioristas e seus seguidores acreditavam que nascemos uma tábula rasa, por assim dizer — ou seja, que todos os nossos comportamentos são resultantes do aprendizado. Os etólogos e especialmente os sociobiólogos, por outro lado, tendiam a acreditar que a programação genética tinha um papel importante. Que evidência cada grupo tem em favor de suas alegações?

Os behavioristas podem apontar evidências impressionantes de que grande parte da disposição ética humana não é inata. Tais evidências são muito variadas, incluindo: (1) os tipos drasticamente diferentes de moral em diferentes grupos étnicos e tribos; (2) a ruptura total da moralidade sob certos regimes políticos ou após desastres econômicos; (3) o comportamento brutal e amoral muitas vezes exibido em relação a minorias, especialmente escravos; (4) o comportamento cruel observado na guerra, como atirar em civis e bombardeá-los; (5) a distorção do caráter de uma criança quando privada de mãe ou de um substituto da mãe durante o período crítico da infância ou quando é abusada sexualmente.

Esse tipo de evidência levou os behavioristas e seus seguidores a negar a existência de qualquer comportamento inato e a acreditar que todo comportamento moral é produto da razão, com base em respostas condicionadas a estímulos ambientais. Seus oponentes favoreciam um componente genético considerável.

Todas as evidências que se acumularam durante as últimas décadas indicam que os valores individuais dos seres humanos são resultado tanto de tendências inatas quanto do aprendizado. A maior parte, de longe, é adquirida através da observação e da doutrinação por parte de outros membros do grupo cultural. Mas os indivíduos parecem variar enormemente em sua capaci-

dade de adquirir as regras morais do seu grupo. Essa capacidade inata de adquirir regras éticas e adotar comportamento ético é uma contribuição crucial da hereditariedade. Quanto maior é essa capacidade em um indivíduo, mais bem equipado ele estará para adotar um segundo conjunto de regras éticas que suplementam (e em parte substituem) as regras biologicamente herdadas, baseadas no egoísmo e na aptidão inclusiva.

Alguns indivíduos parecem ser maus, cruéis, egoístas e desonestos desde a infância. Outros parecem ser pequenos anjos desde o começo — sensíveis, de forma alguma egoístas, sempre confiáveis e cooperativos, e honestos até o âmago. Estudos modernos com gêmeos e adoção documentam um componente genético considerável nessas diferentes tendências. As pesquisas dos psicólogos infantis também revelaram variação em traços da personalidade de recém-nascidos e bebês muito pequenos. A maioria desses traços não muda durante a adolescência.⁴

Demonstrar o caráter hereditário de um dado traço é em geral muito difícil. Curiosamente, isso parece ser demonstrável mais facilmente para traços ruins do que para bons. Darwin citou a ocorrência de cleptomania em várias gerações de famílias ricas como evidência da herdabilidade estrita de alguns comportamentos antiéticos. Uma predisposição genética também pode ser muitas vezes inferida no caso de psicopatas. Além disso, a universalidade da agressividade em todos os animais territoriais e em quase todos os primatas (com a possível exceção dos gorilas) deixa pouca dúvida de que os humanos têm uma tendência inata à agressividade. As horrendas taxas de homicídio, abuso doméstico e outros atos de violência entre os humanos são uma triste confirmação dessa herança. Porém, como Darwin corretamente afirmou, “se as más tendências são transmitidas, é provável que as boas também o sejam” (1871: 102).

Mas a hereditariedade não é tudo. A análise do efeito da ordem do nascimento mostrou quão maleáveis alguns traços de persona-

lidade são, incluindo liderança, criatividade, tendências conservadoras e assim por diante.⁵ Será preciso muita pesquisa antes que os traços “morais” humanos possam ser divididos entre aqueles que são fortemente inatos e os que são adquiridos após o nascimento.

Um programa aberto de comportamento

Tanto uma predisposição ética inata para adquirir as regras de uma cultura (a contribuição da “natureza”) quanto a exposição a um conjunto de regras éticas (a contribuição da “criação”) são necessárias para que uma criança cresça respeitando o sistema ético de sua cultura. Vários estudos concluíram que as regras éticas são em grande parte adquiridas durante a infância e a juventude. Estou bastante convencido da validade da tese de Waddington (1960) de que um tipo muito especial de aprendizado está envolvido, um tipo semelhante ao da estampagem em animais, tão bem descrito pelos etólogos e ilustrado pela ligação de um gansinho à sua mãe.

Os seres humanos se distinguem de todos os outros animais pelo quanto o seu programa comportamental é aberto. Com isso quero dizer que muitos objetos do comportamento e as reações a esses objetos não são instintivos, ou seja, não são parte de um programa fechado, e sim adquiridos ao longo da vida. Assim como a gestalt da mãe-ganso fica estampada no gansinho depois que ele sai do ovo, as normas éticas dos seres humanos são dispostas no programa aberto do bebê. O aumento do cérebro e da sua capacidade de armazenar informações permitiu que um número limitado de reações fixas ao ambiente fosse substituído por uma capacidade de armazenar um grande número de programas de comportamento aprendidos. Isso permite uma flexibilidade muito maior e permite um ajuste mais fino. Como Waddington propôs, “a criança humana provavelmente nasce com certa capa-

cidade inata de adquirir crenças éticas, mas sem nenhuma crença em particular” (1962: 126).

Darwin tinha plena consciência do poder da estampagem na juventude: “É notável que uma crença constantemente inculcada durante os primeiros anos de vida, enquanto o cérebro é impressionável, parece adquirir quase a natureza de um instinto”. Esse poder de doutrinação, diz Darwin, leva não só à adoção de normas éticas, mas também à aceitação sem questionamentos de “regras de conduta absurdas” encontradas em várias culturas humanas (1871: 99-100).

Os psicólogos que estudam o aprendizado demonstraram que certas coisas são aprendidas mais rápido que outras. Um animal olfativo aprende os cheiros muito mais rápido que um animal visual e vice-versa. É possível que, se algumas normas morais contribuíssem para o potencial de sobrevivência de alguns grupos durante a história dos homínídeos, isso também favoreceria a seleção de uma estrutura para facilitar o armazenamento de tais comportamentos no programa aberto. Em que parte do cérebro essa informação é recuperada sob as circunstâncias apropriadas ainda não se sabe.

Todo psicólogo infantil sabe quão ansiosas as crianças são para receber informações novas, incluindo regras, e quão prontas elas estão, no geral, para aceitar tais informações.⁶ O sistema de valores de uma pessoa é controlado em grande parte pelo que é incorporado, em sua juventude, a esse programa comportamental aberto. É a grande capacidade desse programa aberto nos humanos que torna a ética possível. E o alicerce erguido na infância dura, em circunstâncias normais, a vida inteira.

Se a tese de Waddington estiver correta, o que se segue é que a educação ética na juventude é de extrema importância. Acabamos de passar por um período no qual uma importância exagerada era dada à liberdade da criança, permitindo que ela desenvolvesse a própria bondade. Rimos da moralização nos livros infantis e tentamos tirar a maior parte da educação moral das escolas. Isso pode

não causar muitos problemas quando os pais fazem seu papel corretamente, mas pode semear o desastre quando os pais falham. Em vista do nosso melhor entendimento da origem da moralidade no indivíduo, não seria hora novamente de colocar mais ênfase na educação moral? É especialmente importante que tal educação comece o mais cedo possível. É a criança pequena que tem mais disposição a aceitar a autoridade e que é mais facilmente impressionável pelas normas. Meia hora de educação ética por dia em uma escola primária poderia ter um impacto enorme. Seria muito menos eficaz dar cursos de ética nas universidades, como foi recentemente demandado por um reitor.

Vivemos em uma época de mudança de valores, e a maioria dos membros da velha geração deplora o esfacelamento da moral. Se alguém viesse dizer que esse esfacelamento se deve em grande parte à deterioração da educação ética da nossa juventude, seria difícil refutar tal afirmação. Uma boa educação ética fortalece a consciência de que somos responsáveis pelas nossas ações, ao treinar as pessoas a se perguntarem, desde a infância, se seu comportamento está de acordo com os padrões mais elevados da sociedade. A poderosa limitação ao comportamento induzida por esse auto-exame é geralmente chamada de consciência.

Boa parte da literatura ética produzida hoje é pessimista, quando não desesperadora. Os deterministas genéticos estão tão impressionados com a herança malévola e agressiva dos seres humanos que se desesperam ao imaginar se algum dia chegará o período no qual o bom legado da humanidade adquira novamente a preponderância sobre “*Das sogenannte Böse*” [o assim chamado mal], como expressou Lorenz (1966). Em outro campo, os psicólogos e os educadores que acreditam na predominância das influências ambientais sobre a herança genética estão frustrados com o fato de que a boa ética não é adquirida, apesar da mais racional apresentação do assunto. Mas eles ignoram a teoria de Wad-

dington segundo a qual as normas éticas precisam ser adquiridas a partir da mais tenra infância, por meio de um processo parecido com a estampagem, e que tais instruções precisam ser incessantes. Quão bem-sucedida a educação moral pode ser é algo bem documentado pela baixa taxa de crimes entre várias comunidades religiosas, como os mórmons, os menonitas, os adventistas do sétimo dia e outros. Tudo que precisamos fazer para melhorar drasticamente a situação é incrementar a educação ética e iniciá-la na menor faixa etária possível.

Muitos leitores poderão sorrir diante de um conselho aparentemente tão antiquado. É isso o melhor que a ciência pode arrumar?, diriam. Deixe-me esclarecer que estou falando sério. Examinei livros didáticos, examinei histórias infantis e vi um bocado de programas de tv. Geralmente eles são feitos para entreter e — se forem educativos — transmitir informação da maneira menos dolorosa possível. Encontra-se aí alguma instrução moral? Ocasionalmente, em programas da tv pública. Mas raramente. Por quê? Porque, poderão dizer, fazer lavagem cerebral em crianças interfere na sua liberdade pessoal, ou lições de moral não são algo divertido e portanto não vendem. Pessoalmente, não vejo como um padrão elevado de comportamento ético pode ser obtido numa cultura se a vontade de implementá-lo estiver ausente.

QUAL É O MELHOR SISTEMA MORAL PARA A HUMANIDADE?

Os maiores problemas que a humanidade já enfrentou, como guerras, doenças e fome, estão sendo combatidos com um sucesso cada vez maior à medida que nos aproximamos da virada do milênio. Por outro lado, uma série de outros problemas está crescendo em importância, e são problemas que em última análise têm a ver

com valores. Entre eles estão a desintegração da família, o problema das drogas, o abuso doméstico e outros atos de violência, um declínio na verdadeira alfabetização (juntamente com um vício cada vez maior em televisão, videogames e esportes profissionais), a reprodução desimpedida, o lixo e a destruição dos recursos naturais e do ambiente. Será que as regras éticas tradicionais do Ocidente podem nos ajudar a lidar com esses problemas pretéritos e futuros?

As normas éticas tradicionais da cultura ocidental são as da tradição judaico-cristã, ou seja, elas se baseiam nos vários mandamentos e injunções articulados no Velho e no Novo Testamento. Da maneira como se encontram formulados nas escrituras sagradas, tais mandamentos parecem ser absolutos, sem admitir nenhum desvio. “Não matarás”, por exemplo, tem uma validade absoluta. No entanto, desligar os aparelhos de um paciente terminal que esteja sofrendo intensamente é um ato de misericórdia. E uma flexibilidade semelhante deve ser aplicada no caso do aborto. Considerando que uma criança indesejada teria de enfrentar uma vida de miséria e abandono ou que sua mãe seria levada ao total desespero, o aborto certamente pareceria a opção mais ética. E não faz sentido arrastar a questão do que é vida para este argumento, porque como biólogo sei que todo óvulo e todo espermatozóide também têm vida.

Há duas razões pelas quais as normas tradicionais do Ocidente não são mais adequadas. A primeira é a rigidez delas. No coração da ética humana está a possibilidade de fazer uma escolha e de avaliar os fatores conflitantes de modo a fazer a escolha certa. Enquanto as normas éticas forem parte da nossa cultura, a responsabilidade de aplicá-las cabe ao indivíduo. Se as regras forem rígidas demais, o indivíduo pode optar por não aderir a elas. Também é importante lembrar que a essência do processo evolutivo é a variabilidade e a mudança; assim, as regras éticas devem ser versáteis o suficiente para lidar com uma mudança de condições. Decisões éticas com

freqüência dependem do contexto. Prescrições absolutas raramente resolvem dilemas éticos e podem, em certas circunstâncias, ser altamente antiéticas se forem seguidas cegamente. Além disso, dependendo das circunstâncias, sempre há uma pluralidade de soluções possíveis, e o melhor resultado pode envolver uma combinação de soluções diferentes para um dilema ético.

A segunda razão é que a humanidade tem, com efeito, passado por uma mudança drástica e acelerada de condições. As regras éticas adotadas pelos pastores do Oriente Médio há mais de 3 mil anos estão se provando inadequadas para a moderna sociedade urbanizada de massas em um mundo superpovoado. O conjunto de padrões morais que mais beneficiaria povos pastorais e estritamente territorialistas é muito diferente daquilo que seria adaptativo nas imensas áreas urbanas de hoje. Como Simpson (1969: 136) corretamente afirmou: “Todos os sistemas éticos que se originaram em sociedades tribais, pastorais ou em qualquer outra condição primitiva se tornaram, em maior ou menor grau, [mal]adaptativos nas condições sociais e ambientais tão diferenciadas do presente”.

Parece-me que há pelo menos três grandes problemas éticos no nosso mundo moderno que podem não estar adequadamente cobertos pelas regras éticas tradicionais do Ocidente. O primeiro é o que Singer (1981: 111-7) chama de “círculo crescente”. Não somente nas sociedades primitivas, mas também nas do Velho Testamento, entre os gregos e mesmo entre os europeus do século XIX na África e na Austrália, a ética empregada em relação a estranhos era totalmente diferente daquela aplicada aos membros do grupo. Nos Estados Unidos os brancos exibiam esse comportamento em relação aos negros, especialmente no Sul, até poucas décadas atrás, e o apartheid na África do Sul era um remanescente contemporâneo desse egoísmo grupal. Mesmo em sociedades etnicamente homogêneas, como a do Reino Unido no século XX, houve ou há

diferenças sobre maiores ou menores virtudes, lealdades e injunções entre grupos religiosos, partidos políticos, grupos profissionais, estratos sociais e assim por diante. Tais diferenças provocam tensões e conflitos. Isso é especialmente verdadeiro se as classes altas e mais articuladas forem as responsáveis pelas normas éticas codificadas, que até certo ponto podem conflitar com a moral dos estratos socioeconômicos mais baixos. A rebelião dos primeiros cristãos contra a moralidade do Império Romano decadente ilustra bem essa situação.

À medida que o círculo de um grupo cresce e grupos com diferentes sistemas éticos se fundem, os conflitos inevitavelmente aparecem, porque cada grupo está convencido da superioridade dos próprios valores morais. Para apreciar esse problema é preciso pensar na diferença de posicionamento moral entre um americano moderno e um fundamentalista islâmico no que diz respeito aos direitos das mulheres ou, no nosso próprio país [Estados Unidos], as diferentes atitudes em relação ao aborto de certos grupos religiosos *versus* grupos feministas. Apesar das dificuldades, a ética do futuro deve abordar o problema de como proceder quando os valores de uma pessoa se chocam com os de outro grupo.

O segundo grande problema ético do nosso tempo é o ego-centrismo excessivo e a atenção excessiva aos direitos do indivíduo. “Expandir o círculo” na nossa sociedade resultou em uma luta legítima por igualdade, especialmente por parte de minorias e de mulheres, mas também teve efeitos colaterais indesejáveis. Martin Luther King Jr. talvez tenha sido o único guerreiro da liberdade a lembrar seus seguidores de que todos os direitos devem vir acompanhados de obrigações. Nosso narcisismo excessivo tem muitas raízes — a sociedade de massas, os ensinamentos de Freud, a reação ao desrespeito que existia antes aos direitos do indivíduo, um sistema político que depende do apelo dos políticos ao eleitor individual e a ênfase das religiões monoteístas na ética individual.

Quase invariavelmente, dilemas cruciais emergem quando é preciso fazer uma escolha entre a ética individual e a da sociedade ou comunidade. Isso pode ser visto em controvérsias como controle de natalidade, taxas ambientais e ajuda humanitária para países superpopulosos.

O terceiro grande problema ético do nosso tempo é proposto pela descoberta da nossa responsabilidade em relação à natureza. O crescimento, tanto da economia quanto da população, costumava ocupar um nível muito alto na escala de valores ocidental. Mesmo que certas pessoas influentes, como o falecido economista F. Hayek, ganhador do prêmio Nobel, e o atual papa [João Paulo II], não tenham conseguido atentar para os perigos da superpopulação, não sei como isso pode continuar a ser ignorado. Algumas das nossas sociedades, como as da China e Cingapura, enfrentaram corajosamente esse problema ao reordenar os valores éticos, apesar da perda decorrente de alguns direitos individuais deplo- rada por muitos humanitários do Ocidente. Quanto mais cedo os países superpopulosos seguirem o exemplo da China e de Cingapura, melhor será para eles, para toda a nossa espécie e para o planeta no qual vivemos.

O dilema que enfrentamos é o conflito entre valores tradicionais e valores recém-descobertos. O direito à reprodução ilimitada e à exploração do mundo natural é inconsistente com as necessidades da posteridade humana, bem como com o direito à existência de milhões de espécies de plantas e animais ameaçados. Onde está o equilíbrio entre a liberdade humana e a consideração com o bem-estar do mundo natural?

A visão segundo a qual a humanidade tem uma responsabilidade com a natureza como um todo é uma noção ética que parece ter surgido incrivelmente tarde. Nos tempos recentes, Aldo Leopold, Rachel Carson, Paul Ehrlich e Garrett Hardin ficaram famosos nos Estados Unidos por sua militância por uma ética ambien-

tal ou de conservação. Mas aquilo que esses americanos modernos consideram eticamente valioso está em conflito com o benefício imediato de alguns indivíduos e, portanto, enfrenta resistências. Porém, se a espécie humana e o mundo natural como um todo quiserem ter um futuro, precisamos reduzir as tendências egoístas no nosso sistema de valores em prol de uma consideração maior com a comunidade e com o resto da criação. Isso requer uma rejeição do ideal de crescimento contínuo e a sua substituição pelo ideal de uma economia em estado estacionário, mesmo se a consequência disso for uma redução no nosso padrão de vida. A transição de uma sociedade agrícola ou pastoril para uma sociedade urbana de massas demanda ajustes consideráveis nos nossos valores. A mesma exigência é apresentada pela transição de um mundo com baixa densidade demográfica para o mundo industrial moderno, com sua superpopulação maciça e cidades gigantescas. As regras éticas do futuro devem ser flexíveis o bastante para evoluir à medida que esses problemas aparecem, se quisermos continuar a ser uma espécie adaptada.

A premissa básica da nova ética ambiental é que nunca devemos fazer nada com o ambiente (no sentido mais amplo da palavra) que dificulte a vida para as gerações futuras. Isso inclui a exploração desenfreada dos recursos naturais não renováveis, a destruição dos habitats naturais e a reprodução além do mínimo necessário para a substituição dos pais. Esse princípio é muito difícil de fazer cumprir, porque inevitavelmente entra em conflito com considerações egoístas. Será preciso um longo período de educação de toda a humanidade para que essa ética ambiental seja compreendida. Tal educação deve começar entre as crianças pequenas, cujo interesse aparentemente natural pelos animais, por seu comportamento e por seu habitat pode ser usado para reforçar valores ambientais.

Há alguma ética particular que um evolucionista deva adotar? A ética é um assunto privado, uma escolha muito pessoal.

Meus próprios valores se aproximam do humanismo evolutivo de Julian Huxley. “É uma crença na humanidade, um sentimento de solidariedade para com a humanidade e uma lealdade à humanidade. O homem é produto de milhões de anos de evolução, e nosso princípio ético mais básico deveria fazer de tudo para melhorar o futuro da humanidade. Todas as outras normas éticas podem ser derivadas dessa base.”

O humanismo evolutivo é uma ética exigente, porque diz a todo indivíduo que, de algum jeito, ele compartilha a responsabilidade pelo futuro da nossa espécie, e que essa responsabilidade pelo grupo maior deve ser tanto parte da ética cultural quanto uma preocupação individual. Toda geração é guardiã não só do *pool* genético humano, mas também de toda a natureza do nosso frágil globo.

A evolução não nos dá um código de normas éticas como os Dez Mandamentos. Porém, ela nos deu uma capacidade de ir além das nossas necessidades individuais e levar em conta as do grupo maior. E uma compreensão da evolução pode nos dar uma visão de mundo que sirva de base a um sistema ético sólido — um sistema ético que possa manter uma sociedade humana saudável e prover o futuro de um mundo preservado pela mão responsável do homem.⁷

Notas

1. O QUE SIGNIFICA “VIDA”? [PP. 19-46]

1. A busca se torna ainda mais fútil se as palavras “mente” ou “consciência” são usadas no lugar de “vida”. Essa substituição foi feita para facilitar a demarcação entre a vida humana e a dos animais, mas acabou se revelando uma estratégia ruim, porque tampouco existe uma definição tanto de mente quanto de consciência que seja aplicável apenas aos humanos e exclua todos os animais.

2. No século passado foram feitas muitas tentativas de definir a vida ou o viver em uma frase simples, algumas delas baseadas em fisiologia, outras baseadas em genética, mas nenhuma delas é completamente satisfatória. O que teve sucesso foi uma descrição ainda mais correta e ainda mais completa de todos os aspectos do viver. É possível dizer que “a vida consiste nas atividades de sistemas auto-organizados que são controlados por um programa genético”. Rensch (1968: 54) enuncia: “Os organismos vivos são sistemas abertos hierarquicamente ordenados compostos predominantemente de moléculas orgânicas, consistindo normalmente em indivíduos marcadamente delimitados compostos de células e com um tempo de vida limitado”. Sattler (1986: 228) diz que um sistema vivo pode ser definido “como um sistema aberto que se auto-replica, se auto-regula, exhibe individualidade e se alimenta de energia extraída do ambiente”. Esses enunciados são mais descrições que definições; eles contêm frases que não são necessárias e omitem referências ao programa genético, talvez o traço mais característico dos organismos vivos.

3. Os historiadores Maier (1938) e Dijksterhuis (1950, 1961) descreveram esplendidamente a mudança gradual desde os gregos, passando pela Idade das Trevas, até a filosofia escolástica e, finalmente, ao raiar da Revolução Científica, indicada pelos nomes Copérnico, Galileu e Descartes. Esses historiadores determinaram as múltiplas influências sobre esse desenvolvimento e o que ele reteve da tradição grega. Isso inclui, por exemplo, “o esforço apaixonado da ciência física clássica de procurar o imutável por trás da variabilidade dos fenômenos em toda parte” (Dijksterhuis, 1961: 8), ou seja, o essencialismo. “A idéia fundamental de toda a filosofia [de Platão] é que as coisas por nós percebidas são apenas cópias imperfeitas, imitações ou reflexos das formas ideais ou idéias” (Dijksterhuis, 1961: 13). Platão evidentemente teve mais influência nos desdobramentos dessas idéias do que Aristóteles. Foi ele quem “endossou de corpo e alma o princípio pitagórico [...] enquanto germe da matematização da ciência”. “Platão torna o cosmos um ser vivo ao investir o corpo mundano de uma alma mundana” (Dijksterhuis, 1961: 15).

4. Na verdade, esta é uma apresentação bastante simplista da via pela qual Descartes chegou à sua conclusão. A história remonta aos ensinamentos aristotélicos, aceitos pelos filósofos escolásticos, de que as plantas têm uma alma nutritiva e os animais têm uma alma sensível e somente o homem tem uma alma racional. A alma sensível dos animais tinha substância material, ao passo que a alma racional era imortal. As capacidades da alma sensível dos animais eram limitadas a percepções sensoriais e à memória. A partir dessas discussões, fica claro que Descartes entendia como alma (racional) a “consciência reflexiva do eu e do objeto do pensamento”. Atribuir aos animais a capacidade de pensamento racional seria dar a eles uma alma imortal, e isso para Descartes era uma posição inaceitável, porque significava que suas almas iriam para o céu. (O pensamento ateu de que talvez não houvesse céu nenhum para as almas humanas aparentemente nunca ocorreu a ele.) Em última análise, o raciocínio de Descartes era baseado em definições escolásticas de substância e essência, que excluíam por princípio a existência de alma nos animais e a limitaram aos humanos pensantes, racionais. Essa conclusão eliminou a possibilidade inaceitável de os animais terem uma alma imortal que ia para o céu após a morte (Rosenfield, 1941: 21-2). Se se pudesse negar uma alma aos animais, tornava-se auto-evidente que não se poderia aceitar a crença, ainda disseminada na Europa no século XVII, de que uma alma, uma anima ou *vita mundi*, permeava o universo.

5. A palavra mecanicista foi usada ao longo de todo o século XIX e parte do XX com dois significados diferentes. Por um lado, ela se referia à visão daqueles que negavam a existência de quaisquer forças sobrenaturais. Para os darwinistas, por exemplo, significava a negação da existência de qualquer teleologia cósmica. No entanto, para outros, o principal significado da palavra mecanicista era uma

crença de que não havia diferença entre os organismos e a matéria inanimada, de que não existem processos específicos da vida. Esse era o principal significado de mecanicista para os fisicalistas.

6. Nägeli (1845: 1) diz que, sobre os termos específicos usados numa explicação, deve ser postulado “que eles sejam expressos geralmente, absolutamente e na forma de movimento”. Rawitz (ver Roux, 1915) define vida como “uma forma especial de movimentos moleculares, e todas as variações da vida são variantes dela”.

7. A maioria das histórias do vitalismo existentes é unilateral, tendo sido escrita ou por vitalistas como Driesch (1905) ou por seus adversários, que não viam nada de bom no vitalismo. Talvez a melhor narrativa seja a de Hall (1969, caps. 28-35). O tratamento dado ao tema por Blandino (1969) se concentra em Driesch; e Cassier (1950), da mesma maneira, se concentra em Driesch, seus seguidores e seus adversários. A concisa apresentação de Jacob (1973) é equilibrada e segue o destino do vitalismo do animismo em diante. Uma história ainda mais completa e verdadeiramente equilibrada, no entanto, ainda não existe.

8. Como Lenoir (1982) corretamente apontou.

9. “De fato, várias formas de vitalismo representam extensões bastante legítimas do programa cartesiano na biologia mecanicista com meios newtonianos” (McLaughlin, 1991).

10. A semelhança entre o conceito de *Lebenskraft* de Müller e o conceito de programa genético pode ser documentada por algumas citações: “A *Lebenskraft* [de Müller] age em todos os organismos como causa e atuador supremo de todos os fenômenos de acordo com um plano definido [programa]” (DuBois-Reymond, 1860: 205). Partes da *Lebenskraft*, “representando o todo, são transmitidas na reprodução sem causar perda alguma a todo germe onde ela pode permanecer dormente até a germinação” (ibid.). Os quatro dos principais atributos da *Lebenskraft* listados por Müller são com efeito características de um programa genético: (1) não ser localizada em um órgão específico; (2) ser divisível em um grande número de partes, todas retendo as propriedades do todo; (3) desaparecer com a morte sem deixar nenhum remanescente (não há uma alma que se desprende); (4) agir de acordo com um plano (ter propriedades teleonômicas). Descrevi as crenças de J. Müller em um grau considerável de detalhe, para corrigir o tratamento ruim dado a elas por fisicalistas como DuBois-Reymond, que chamou Müller de metafísico anticientífico.

11. Von Uexküll, B. Dürken, Meyer-Abich, W. F. Agar, R. S. Lillie, J. S. Haldane, E. S. Russell, W. McDougall, DeNouy e Sinnott, para citar apenas alguns dos numerosos vitalistas do começo do século XX. Ghiselin (1974) chama W. Cannon, L. Henderson, W. M. Wheeler e A. N. Whitehead de criptovitalistas.

12. Goudge (1961), Lenoir (1982). Uma oposição ao selecionismo de Darwin também era uma componente freqüente dos argumentos dos vitalistas (Driesch, 1905).

13. Começando com C. F. Wolff (1734-94), desenvolveu-se a idéia de que havia uma coisa básica e indiferenciada que dava origem aos elementos mais formados. F. Dujardin (1801-60) foi o primeiro a descrevê-la e defini-la apropriadamente (1835), chamando-a de "sarcodo". Uma atenção cada vez maior foi dada a ela à medida que a microscopia avançava. Purkinje cunhou o termo "protoplasma" em 1840. Em 1869, o protoplasma era, para T. H. Huxley, a base física da vida. Citoplasma foi o termo introduzido por Kölliker para designar o material celular externo ao núcleo.

14. Na verdade, esse termo vinha sendo usado nas ciências sociais desde os tempos de Comte, embora o organicismo significasse coisas diferentes para cientistas sociais e para biólogos. Bertalanffy (1952: 182) listou cerca de trinta autores que declararam sua simpatia pela abordagem holística. Essa lista, no entanto, era muito incompleta, não incluindo nem mesmo os nomes de Lloyd Morgan, Smuts e J. S. Haldane. O conceito de íntegron de F. Jacob (1973) é um endosso particularmente bem discutido do pensamento organicista.

15. Woodger (1929) dá uma lista impressionante de biólogos que endossaram o ponto de vista organicista. E. B. Wilson (1925: 256), por exemplo, disse que "mesmo a familiaridade mais superficial com as atividades celulares mostra que [explicar a célula como sendo uma máquina química] é algo que não pode ser tomado num sentido mecânico cru — a diferença entre a célula e mesmo a mais intrincada máquina ainda permanece grande demais para ser superada pelo conhecimento atual [...] pesquisas modernas trouxeram um reconhecimento crescente do fato de que a célula é um sistema orgânico, no qual devemos reconhecer a existência de algum tipo de estrutura ordenada ou organização". Como era de esperar, o pensamento holístico sempre esteve bem representado entre os biólogos do desenvolvimento. Ele aparece com força nos escritos de C. O. Whitman, E. B. Wilson e F. R. Lillie. Haraway (1976) dedica a maior parte de um livro inteiro ao organicismo de três embriologistas, Ross Harrison, Joseph Needham e Paul Weiss. Curiosamente, Harrison considerava a emergência um princípio metafísico e, portanto, considerava Lloyd Morgan um vitalista. Como vários biólogos do período pós-1925, ele pensava que os princípios recém-descobertos da física, como a teoria da relatividade, o princípio da complementaridade de Bohr e o princípio da incerteza de Heisenberg, se aplicavam igualmente à biologia e à física.

16. Nagel (1961) definiu o mecanicista na biologia como "aquele que acredita que todos os fenômenos vivos podem ser inequivocamente explicados em termos físico-químicos, ou seja, em termos de teorias que foram originalmente

desenvolvidas para os domínios da pesquisa nos quais a distinção entre vivo e não-vivo não tem papel algum, e que por consenso são classificados como pertencendo à física e à química. Tal redução caracteriza toda a narrativa de Nagel.

17. Por exemplo: "O holismo é uma tendência específica, com um caráter definido e criador de todas as características do universo, e portanto frutuoso de resultados e explicações no que diz respeito a todo o curso do desenvolvimento cósmico" (1926: 100). Não é à-toa que o holismo, da forma como foi apresentado por Smuts, foi amplamente considerado um conceito metafísico.

18. O tema dos níveis de integração foi discutido em grande detalhe num volume especial, produzido a partir de um simpósio (R. Redfield, 1942).

19. Um engano que se tornou particularmente freqüente foi considerar cada nível de integração como um fenômeno global. Não é isso que esses níveis são. Cada íntegron, desde o nível molecular até o supra-organísmico, é singular. Não há conflito entre essa interpretação e o enunciado de Novikoff (1945) de que "as leis que descrevem as propriedades únicas de cada nível são qualitativamente distintas, e sua descoberta requer métodos de pesquisa e análise apropriados ao nível particular", e agora acrescentaríamos, apropriados ao íntegron particular. Um evolucionista moderno diria que a formação de um sistema mais complexo, representando um nível mais alto, é estritamente uma questão de variação genética e seleção. Não há conflito com os princípios do darwinismo.

2. O QUE É CIÊNCIA? [PP. 47-72]

1. Essa literatura começou com Whewell (1840) e levou aos escritos clássicos de Nagel (1961), Popper (1952) e Hempel (1965), assim como aos volumes mais recentes de Laudan (1977), Giere (1988) e McMullin (1988); uma vasta literatura adicional é citada nesses volumes. Todos esses autores e muitos outros tentaram fornecer uma resposta definitiva a essa pergunta. Pearson (1892) sentia que o que caracterizava a ciência era o compartilhamento de uma mesma metodologia. Mas esse critério omite a consideração importante de que todas as ciências verdadeiras, como veremos, compartilham também certos princípios, como o da objetividade.

2. Nagel (1961: 4). É claramente mais fácil descrever o que a ciência é e o que os cientistas fazem do que fornecer uma definição concisa e universalmente aceitável. Exemplos de descrições são: "A ciência estuda coisas que são intrigantes e que, portanto, apelam para a curiosidade humana"; ou "As funções da ciência são a previsão, o controle, o entendimento e a descoberta das causas" (Beckner, 1959: 39); ou "A ciência é a organização e a classificação do conhecimento com base em princípios explicativos" (Nagel, 1961: 4). Outras

definições são: “A ciência é o esforço no sentido de aumentar a nossa compreensão do mundo com base em princípios explicativos e com um teste contínuo de todas as descobertas (Mayr ms.); ou “A ciência empírica tem dois objetivos principais: descrever fenômenos específicos no mundo da nossa experiência e estabelecer princípios gerais pelos quais tais fenômenos possam ser explicados e previstos” (Hempel). Outras: “A ciência compreende todas as atividades do intelecto humano que dependem inteiramente de dados objetivos e lógica; e também uma testabilidade ilimitada de suas teorias”; ou, ainda, a ciência consiste em “sentenças logicamente generalizadas que são direta ou indiretamente abertas a confirmação ou refutação observacional, e podem ser empregadas em explicações e previsões”; ou ela é “a organização e a classificação do conhecimento com base em princípios explicativos”.

3. Para uma discussão detalhada da natureza do problema científico, ver Laudan (1977).

4. Ver Hall (1954).

5. Ver Mayr (1996).

6. O filósofo alemão Windelband (1894) distinguiu entre dois tipos de ciências, as nomotéticas e as idiográficas, com o termo ciência usado no sentido alemão de *Wissenschaft* (incluindo as humanidades). Sua terminologia tinha o objetivo de separar as ciências normais (nomotéticas) das humanidades (idiográficas). Essa afirmação foi invalidada porque deixava a biologia de fora da classificação. Sua caracterização das ciências idiográficas como aquelas que lidavam com fenômenos únicos e não recorrentes fora pensada para as humanidades, mas essa descrição se encaixa em muitas das ciências naturais, em particular a biologia evolutiva, como corretamente apontou Nagel (1961: 548-9). Hoje entendemos que o contraste entre a “ciência” e as “humanidades” não é nem de longe tão marcado quanto Snow e Windelband pensavam que fosse. Essa nova visão é resultado de diversas considerações: (1) Aquilo que tanto os filósofos da ciência fisicalistas quanto os humanistas tradicionalmente designaram como “ciência” era na realidade a física, apenas uma das ciências. (2) A erosão do determinismo estrito e da crença na importância exagerada das leis universais tornou o contraste entre a ciência (incluindo as ciências físicas) e as humanidades muito menos absoluto. (3) Considerar a biologia, especialmente a biologia evolutiva, como uma parte da ciência estabelece uma ponte entre as ciências naturais e as humanidades. (4) Os processos históricos, tão negligenciados na maioria das ciências físicas, são elegíveis para a análise científica e devem, portanto, ser incluídos nos limites da ciência.

7. Gosto de lembrar o pesquisador frustrado da delicada admoestação de Stern (1965: 773): “Quaisquer que sejam os perigos que as fraquezas pessoais possam apresentar ao investigador, ele pode se erguer sobre eles. Ele pode reter o

entusiasmo da juventude, que o levou a contemplar os mistérios do universo. Ele pode continuar a agradecer o extraordinário privilégio de participar da exploração desses mistérios. Ele pode incessantemente encontrar prazer nas descobertas feitas por outros homens, os do passado e os de seu próprio tempo. E ele pode aprender a difícil lição de que é a própria jornada, e não apenas a grande conquista, o que dá sentido à vida humana”.

8. Ver Hull (1988).

9. “Perceber um fato da natureza que nunca antes havia sido visto por nenhum olho ou nenhuma mente humana, descobrir uma nova verdade em qualquer campo, ou um evento da história pretérita, ou discernir uma relação escondida, tais experiências seu feliz sujeito acalentará para o resto da vida” (Stern, 1965: 772). Muitos cientistas, em suas autobiografias e em outros escritos, exaltaram as alegrias da pesquisa (Shropshire, 1981).

3. COMO A CIÊNCIA EXPLICA O MUNDO NATURAL? [PP. 73-96]

1. Mayr (1964a, 1991) e Ghiselin (1969).

2. Conforme enunciado por Kitcher (1993), a filosofia da ciência “se esforçou para analisar a boa ciência ao focar questões como a confirmação das hipóteses por evidências, a natureza das leis e teorias científicas e as características da explicação científica”.

3. Este trabalho não é o lugar para apresentar uma história da filosofia da ciência. A literatura desse campo é enorme, e não fui educado como filósofo. Meu tratamento visa refletir o ponto de vista do cientista praticante.

4. Ver Ghiselin (1969).

5. Ver Laudan (1968).

6. De todos os métodos considerados capazes de contribuir para a verificação, aquele no qual confio menos é a analogia. Sempre suspeito quando alguém tenta ganhar um argumento com a ajuda de analogias. Com efeito, elas são quase invariavelmente enganosas: não conseguem ser isomórficas à situação real. As analogias às vezes são uma ferramenta didática útil, permitindo-nos explicar algo incomum ao tecer uma comparação com uma situação familiar. No entanto, elas nunca podem ser tratadas como uma evidência decisiva em uma argumentação.

7. Uma teoria normalmente prevalece até ser substituída por uma melhor. Há uns poucos casos excepcionais, no entanto, nos quais todas as teorias prévias foram refutadas decisivamente, mas ninguém foi capaz de propor uma teoria substituta adequada. O senso de direção das aves migratórias é um exemplo de problema científico que hoje não tem uma teoria explicativa.

8. Ver Van Fraassen (1980).

9. Outros semanticistas ressaltaram que as teorias são formalizadas em teoria pronta (o que quer que isso signifique) em vez de por axiomas de lógica matemática, como na visão recebida. Elas empregam “modelos” — “entidades não lingüísticas altamente abstratas e afastadas dos fenômenos empíricos aos quais elas são aplicadas (Thompson, 1989: 69). As teorias definem uma classe de modelos; as leis especificam o comportamento de um sistema. O problema com essa terminologia é que o conceito de teoria pronta é um modelo alienígena para a maioria dos biólogos. Por exemplo, não me lembro de ter encontrado o termo modelo uma única vez em toda a literatura evolutiva clássica.

10. Para a sorte dos não-filósofos, existem alguns excelentes textos sobre a história desses esforços explicativos (por exemplo, Suppe, 1974; Kitcher e Salmon, eds., 1989).

11. Esse foco estreito da filosofia na justificação para a exclusão da descoberta foi criticado por Peirce (1972), Hanson (1958), Kuhn (1970), Feyerabend (1962, 1975), Kitcher (1993) e outros filósofos.

12. Laudan (1977: 198-225) apresenta uma análise excelente desse conflito. Ele corretamente afirma que “até que a história racional de qualquer episódio tenha sido escrita, o sociólogo cognitivo deve simplesmente morder sua língua”. “A razão principal para o fracasso dos sociólogos em encontrar uma correlação entre a crença científica e a categoria social é que a imensa maioria das crenças científicas (embora de forma alguma todas elas) parece não ter importância social nenhuma.”

13. Ver Mayr (1982: 4).

14. Ver Junker (1995).

15. Para tomar um outro exemplo, a idéia de diferenças genéticas entre humanos parece extremamente impalatável a um igualitário radical. Laudan (1977) observa: “Tem sido sugerido que qualquer teoria científica que sugira a existência de diferenças de capacidade ou inteligência entre as várias raças [humanas] deve necessariamente ser suspeita porque tal doutrina contraria nosso quadro político e social igualitário”.

16. Não me sinto qualificado para discutir outros esforços recentes de explicação. No entanto, me parece que as abordagens causais de Laudan (1977), Salmon (1984, 1989) e Kitcher (1993) talvez cheguem mais perto das reais práticas dos biólogos. Tem-se considerado cada vez mais que a avaliação de uma teoria não é uma questão de simples regras lógicas e que a racionalidade tem de ser construída em termos mais amplos do que aqueles oferecidos pela lógica dedutiva ou indutiva.

17. Isso foi reconhecido por Laudan (1977: 3) quando ele disse: “A racionalidade e a progressividade [eu diria simplesmente ‘adequação’] de uma teoria

são mais ligadas não à sua confirmação ou falsificação, mas à sua eficiência em resolver problemas”.

18. A questão da natureza da realidade, que tanto preocupou a filosofia, tem sido notavelmente irrelevante para os trabalhos práticos dos cientistas, em especial os biólogos. Existe uma enorme literatura sobre o realismo. Alguns livros recentes são os de Harré (1986), Leplin (1984), McMullin (1988), Papineau (1987), Popper (1983), Putnam (1987), Rescher (1987) e Trigg (1989).

19. Essa situação é bem compreendida por alguns filósofos, como por exemplo Hempel (1952) e Kagan (1989), enquanto outros ignoraram completamente a importância de se ter terminologias precisas e bem definidas e de evitar equívocos.

20. Uma mudança confusa do tipo foi a proposta de W. Hennig (1950) de transferir o termo “monofilético” de seu sentido tradicional, que é o de atributo de um táxon, para o sentido de processo de descendência. A confusão causada por essa transferência pode ser evitada ao usar o termo “holofilético”, de Ashlock, para o novo conceito de Hennig (ver o capítulo 7).

21. Ghiselin (1984) chamou a atenção para a freqüência de tais equívocos. É curioso notar que os filósofos, que tanto se orgulham da precisão de sua lógica, são tudo menos precisos no seu uso da linguagem. Essa imprecisão foi justamente castigada pelo filósofo L. Laudan: “O diálogo filosófico é uma atividade curiosa. Espera-se que os argumentos sejam rigorosos, mas não existe nenhuma demanda por evidências que apóiem as premissas. Espera-se que a terminologia seja precisa, mas sua adequação ao tema discutido pode ser deixada inexplorada [...] acima de tudo, as evidências que avalizariam as asserções filosóficas são, como os tópicos sexo e religião para os menos esclarecidos, uma dessas questões delicadas que nunca se deve discutir em público” (PSA 1978, vol. 2, 1979).

22. Ver Mayr (1986a, 1991, 1992b). Outros exemplos são desenvolvimento (ontogenia *versus* filogenia), população (biológica *versus* conjunto matemático), espécie (tipológica *versus* biológica), função (papel fisiológico *versus* ecológico) e gradualismo (táxico *versus* fenotípico).

23. O termo variedade foi usado em zoologia no sentido de raça geográfica e, portanto, de uma espécie incipiente em potencial, mas o termo também foi usado, especialmente pelos botânicos, para indivíduos aberrantes em uma população.

24. A literatura taxonômica ficou muito mais clara quando o termo táxon foi adotado, por volta de 1950, para os grupos botânicos e zoológicos, e o termo categoria, restrito aos níveis da hierarquia lineana, enquanto antes o termo categoria era aplicado a tudo. Recentemente, Toulmin corretamente chamou a atenção para o fato de que qualquer palavra (termo) usada em uma teoria car-

rega consigo parte do significado que tinha antes de a teoria ser proposta. Isso é especialmente verdadeiro quando os apoiadores e os oponentes de determinada teoria sustentam *Weltanschauungen* [visões de mundo] muito diferentes. Para qualquer teleologista — e a maioria dos contemporâneos de Darwin era teleologista —, a seleção significava algo completamente diferente da descrição *a posteriori* de Darwin de sucesso reprodutivo e sobrevivência diferenciais. Para um essencialista, uma espécie é algo sem variabilidade essencial e constante ao longo do tempo. Ela pode mudar apenas por saltação e, portanto, é incompatível com o conceito biológico de espécie. Seria possível listar todos os termos envolvidos nas principais controvérsias científicas e provavelmente mostrar que a maioria deles tinha diferentes significados ou conotações, dependendo da *Weltanschauung* do respectivo proponente.

25. Não deveria nunca haver tensão entre uma definição e a interpretação científica do fenômeno ao qual o termo se aplica. A função básica de uma definição é a de dispositivo heurístico. Com efeito, algumas vezes tem-se descoberto problemas quando se percebe que a definição tradicional não mais se enquadra no assunto. “Redefinições em ciência não são rupturas completas com a definição tradicional, e sim formulações mais precisas de termos que haviam sido previamente usados de maneira vaga ou equivocada” (Ghiselin *in litt.*). As redefinições são possibilitadas por uma análise mais profunda ou por novas descobertas. Por exemplo, Owen definiu a homologia como “o mesmo” órgão, mas a teoria de Darwin da origem comum permitiu uma definição mais precisa. A redefinição nunca deveria envolver a substituição do conceito velho por um conceito inteiramente novo.

26. Como enunciado por Hempel (1952), “uma definição real, de acordo com a lógica tradicional, não é uma estipulação que determina o significado de uma expressão, mas um enunciado da ‘natureza essencial’ ou dos ‘atributos essenciais’ de uma entidade”. Para o filósofo, “definições descrevem formas, e, uma vez que as formas são perfeitas e imutáveis, as definições [...] são verdades precisas e rigorosamente certas” (*Encyclopedia of philosophy*).

27. A confusão de Popper fica bem ilustrada pela seguinte declaração: “Nunca se deixe constranger a levar a sério os problemas sobre as palavras e seu significado. O que deve ser levado a sério são as questões de fato e as asserções sobre os fatos: teorias e hipóteses; os problemas que elas resolvem; e os problemas que elas levantam”. Esse enunciado esconde o fato de que, em toda teoria e em todo conceito, precisamos usar palavras que devemos definir. Não é possível discutir teorias e hipóteses até que se esclareça o que são essas teorias e quais são os fatos. E, uma vez que usamos palavras para descrever essas teorias e esses fatos, precisamos defini-los cuidadosamente, ou corremos risco de nos enganar. Meus exemplos anteriores (especiação, teleológico, seleção etc.) mos-

traram claramente quão indispensáveis são as definições claras de qualquer palavra que usemos em uma teoria ou explicação.

Mais adiante nesse capítulo Popper coloca os significados e a verdade em posições opostas. Ele alega que o estudo dos significados não leva a lugar nenhum e que tudo na ciência tem a ver com uma aproximação da verdade, e enfatiza: “Nos assuntos do intelecto, a única coisa pela qual vale lutar são as teorias verdadeiras, ou as teorias que se aproximam da verdade”. Mas ele não vê que é impossível termos uma teoria verdadeira, digamos, da especiação, se não tivermos primeiro estabelecido o significado da palavra especiação: queremos nos referir à multiplicação das espécies ou à mudança evolutiva? Fica bem evidente, portanto, que a busca de significados e a busca da verdade não são duas alternativas, mas que, com efeito, a verdade não pode ser alcançada sem que tenhamos estabelecido claramente o significado das palavras que são usadas. É irônico que, quase no fim do capítulo, que ele chama de “uma longa digressão sobre o essencialismo”, Popper deixe escapar que “precisamos entender as palavras a fim de entender a teoria”. Com essa única frase, ele virtualmente revoga todas as suas afirmações anteriores de uma oposição estrita entre o significado e a verdade. O que Popper de fato diz é exatamente o mesmo que eu, que não é possível estabelecer a verdade sem primeiro ter estabelecido o sentido das palavras que usamos. Ghiselin ressaltou de maneira muito lúcida que podemos dar definições apenas de conceitos, mas que os particulares reais podem apenas ser descritos. Assim, é possível definir a categoria espécie, mas os táxons de espécie podem apenas ser nomeados, descritos e delimitados.

28. Uma nota final sobre a linguagem: quando os cientistas se encontram travados numa controvérsia sobre determinada questão, eles às vezes escolhem palavras com conotações negativas e as aplicam ao trabalho de seus oponentes: “Meu trabalho é dinâmico; o seu é estático”, “O meu é analítico; o seu é meramente descritivo”, “Minha explicação é mecanicista (ou seja, baseada em princípios químicos e físicos), enquanto a sua explicação é holística (ou seja, metafísica)”. O oponente no mais das vezes não tem problemas em responder à altura, mas tais trocas de palavras vazias raramente promovem o interesse de longo prazo da ciência.

4. COMO A BIOLOGIA EXPLICA O MUNDO VIVO? [PP. 97-115]

1. Goudge (1961), Hull (1975b), Bock (1977), Nitecki e Nitecki (1992) e outros.

2. Ver White (1965).

3. Se a especiação é um processo gradual e lento, e se houver (e, de fato, há!) centenas de milhares, se não milhões, de populações (espécies incipientes) em vários estágios de especiação no momento atual, então deveria ser possível reconstruir todo o processo de especiação ao colocar "instantâneos" desses vários estágios na sequência apropriada. Essa é a mesma metodologia que foi usada nos anos 1870 e 1880 pelos estudiosos da citologia para reconstruir o processo da divisão celular. Eles dispuseram centenas de lâminas de microscópio numa sequência progressiva que contasse a história. Fiz (Mayr, 1942) a mesma coisa com populações naturais que representam todos os estágios do "tornar-se uma espécie", e desde então isso também foi feito por vários outros autores (ver também Mayr e Diamond, 1997).

4. Isso nos leva ao problema filosófico extremamente complexo da causa e causalção. Este livro não é o local adequado para a análise desse espinhoso problema. Portanto, não vou discutir a crítica da causalção de Hume, segundo a qual tudo o que podemos determinar é simplesmente uma sequência dos eventos. Concorde com os filósofos modernos que admitem que um evento antecedente pode ter um efeito, tornando-se portanto uma causa. Sequências estritamente causais podem ser demonstradas com frequência no comportamento animal. Portanto, não acho que haja nada de não-científico em aceitar a causalidade como ela se apresenta para o senso comum.

5. Não que tais estudos de caso não tenham sido propiciados antes: o exemplo mais destacado é a aplicação da abordagem semântica à biologia evolutiva por Lloyd (1987). No entanto, apresentarei agora diversos casos de formação de teoria, começando com os mais simples e indo até os mais complexos. Isso permitirá ao filósofo que favorece uma dada abordagem para a formação de teorias testar até que ponto sua abordagem é aplicável ao caso particular em estudo.

6. Ver também Mayr (1982, 1989a).

7. A sugestão de Lorenz, em seus principais pontos, foi adotada também por Donald Campbell, Riedl, Oeser, Vollmer, Wuketis, Mohr e muitos outros biólogos e filósofos.

8. Ver Kagan (1994).

9. Há uma curiosa controvérsia na literatura sobre se o cérebro humano é adaptado para entender o mesocosmos. Aqueles que negaram isso aparentemente tinham um conceito teleológico de adaptação e seleção. Mas a adaptação darwinista não é teleológica. Não há necessidade de considerar os indivíduos que sobrevivem ao processo de eliminação não-aleatória como os produtos de um processo direcionado a um fim. Um indivíduo que sobrevive ao processo de seleção é, pode-se dizer, por definição adaptado. O darwinista tem plena ciência do fato de que todos os sobreviventes devem seu destino também em grande parte a processos estocásticos. Aceitar esse conceito não-teleológico de adaptação nos

permite concluir: "Sim, o cérebro humano é adaptado para o entendimento do mesocosmos". Todos os indivíduos que eram inferiores nessa capacidade particular foram eliminados mais cedo ou mais tarde sem deixar descendentes.

10. Ver Regal (1977).

11. Hamilton (1964).

5. A CIÊNCIA AVANÇA? [PP. 116-50]

1. Ver Stent (1969).

2. Os avanços graduais no conhecimento foram descritos de forma excelente em diversos textos históricos. Isso inclui os livros de Hughes (1959), Baker (1948-1955) e Cremer (1985), bem como monografias de Coleman (1965), Churchill (1979) e outros. Para referências, ver o volume de Cremer.

3. Cremer (1985) descreve em grande detalhe essas contribuições.

4. Mayr (1982: 810-1).

5. Os técnicos incluíam Fol, Buetschli, Strasburger, Van Beneden e Flemming; os teóricos, Roux (1883), Weismann (1889) e Boveri (1903).

6. Hoyningen-Huene (1993) apresentou uma análise excelente das visões de Kuhn, incluindo várias mudanças após 1962. Para um conjunto anterior de críticas, ver Lakatos e Musgrave (1970).

7. Ver Mayr (1991).

8. Ver Mayr (1972).

9. Ver Maynard-Smith (1984: 11-24).

10. Hoyningen-Huene (1993: 197-206).

11. Ver Bowler (1983).

12. Ver Mayr (1946).

13. Ver Mayr (1990).

14. Ver Barrett et al. (1987).

15. Isso foi colocado de forma particularmente forte por Thagard (1992).

16. Ver Mayr (1952).

17. Ver Mayr (1992c).

18. Ver Mayr (1942).

19. Este é o assunto principal do magistral volume *Science as a process*, de Hull (1988).

20. Mayr (1954, 1963, 1982, 1989), Eldredge e Gould (1972), Stanley (1979).

21. O que é, e o que não é, acessível à ciência foi analisado por Medawar (1984) e Rescher (1984). Enquanto muitas pessoas, como DuBois-Reymond, subestimaram o potencial da ciência, muitas outras tendem a superestimá-lo.

6. COMO SE ESTRUTURAM AS CIÊNCIAS DA VIDA? [PP. 151-72]

1. A separação tradicional entre a zoologia e a botânica sobreviveu em livros-texto, currículos escolares e classificações de biblioteca antes de ser substituída por outras formas de classificação no domínio da biologia. Conheço apenas um trabalho na literatura que se dedica especificamente a discutir a estrutura da biologia (Tschulok, 1910), mas ele ainda aceita a divisão tradicional da biologia em zoologia e botânica, sendo portanto de pouco interesse para o leitor moderno.

Os termos zoologia e botânica, no entanto, mudaram de significado com o progresso da pesquisa biológica. A *Generelle Morphologie*, de Haeckel (1866) era incrivelmente newtoniana, ao definir a natureza como um sistema de forças inerentes à matéria. Conseqüentemente, a zoologia precisava ser dividida em morfologia (a zoologia da matéria) e fisiologia (a zoologia das forças). Na fisiologia, Haeckel descreveu também a relação dos organismos uns com os outros e com seu ambiente, ou seja, a ecologia e a biogeografia. A ontogenia e a filogenia estavam incluídas na morfologia. O estudo do comportamento foi aparentemente ignorado. Haeckel, portanto, considerava a ecologia, a biogeografia e a sistemática como sendo partes legítimas da biologia, enquanto o botânico Schleiden, em sua tentativa reducionista de reformar a biologia, não deixou lugar em seu sistema para os aspectos organizmicos das plantas (Schleiden, 1842).

2. Ver Müller (1983).

3. Schleiden (1838) e Schwann (1839).

4. Ver Gerard (1958).

5. Weiss (1953: 727).

6. A possibilidade de reduzir a biologia à física era invariavelmente ilustrada por alguns processos fisiológicos simples, ignorando-se completamente a biologia evolutiva e outros aspectos da biologia que não podem ser reduzidos à física (Nagel, 1961). Essa atitude é bem ilustrada, por exemplo, por Needham, que em 1925 (244) descreveu as recentes mudanças na biologia como “uma mudança da morfologia comparada para a bioquímica comparada” e previu que a bioquímica comparada seria um dia transformada em biofísica eletrônica. Ele sugeriu que o interesse na evolução fosse substituído pela teoria mecanicista da vida. E, uma vez que o “mecanicismo é um conceito mais inclusivo que a evolução, ele é também mais profundo e, portanto, faz mais jus à cooperação da filosofia”.

7. Handler (1970).

8. Lorenz (1973a) enfatizou rigidamente esse ponto. Mainx (1955: 3) construiu um bom relato sobre o papel da descrição na pesquisa biológica.

9. Hennig (1950), Simpson (1961), Ghiselin (1969), Mayr (1969), Bock (1977), Mayr e Ashlock (1991) e Hull (1988).

10. Ver Mayr (1961).

11. Allen (1975: 10).

12. “O estruturalismo assume que não há uma ordem lógica no reino biológico e que os organismos são gerados de acordo com princípios dinâmicos racionais” (Goodwin, 1990).

13. “Somente se [nenhuma explicação puder ser deduzida a partir de princípios gerais] é que se pode aceitar uma explicação histórica, na falta de algo melhor” (Goodwin, 1990: 228).

14. A história das contribuições respectivas dos botânicos e dos zoólogos para o avanço da biologia é fascinante, mas ainda não foi escrita. Não havia zoologia de verdade antes do século XIX, apenas suas precursoras, a história natural e a fisiologia (incluindo a embriologia). A botânica era claramente dominante, devido à figura proeminente de Lineu. Mas a substituição da classificação de cima para baixo de Lineu por uma classificação de baixo para cima aparentemente foi em sua maior parte trabalho de zoólogos, apesar das publicações pioneiras de Adanson e Jussieu. A citologia foi um exemplo de conquista conjunta de botânicos (Schleiden) e zoólogos (Schwann), com outros botânicos (por exemplo, Brown) e outros zoólogos (Meyen, Remak, Virchow) dando contribuições significativas. A genética é outro ramo igualmente desenvolvido por botânicos (Mendel, DeVries, Johannsen, East, Correns, Müntzing, Nilsson-Ehle, Renner, Baur) e zoólogos (Weismann, Bateson, Castle, Morgan, Chetverikov, Müller, Sonneborn), para citar apenas alguns dos fundadores desse campo.

15. O fato de os campos clássicos serem indispensáveis foi ressaltado por Stern (1962) e Mayr (1963a).

7. PERGUNTAS DO TIPO “O QUÊ?”: O ESTUDO DA BIODIVERSIDADE [PP. 173-206]

1. Isso foi seguido de um período de preocupação intensa com a construção de filogenias e com a macrotaxonomia, mas a taxonomia básica foi ignorada, se não desprezada, no alvorecer da biologia experimental. As décadas de 1920 a 1950 viveram o florescimento da nova sistemática (Mayr, 1942), seguidas nos anos de 1960 a 1990 pela ascensão da taxonomia numérica e da cladística.

2. Simpson (1961).

3. Ver Mayr (1982: 247-50) para uma discussão mais detalhada das contribuições da taxonomia para a fundação das novas disciplinas da biologia.

4. O fato de que a sistemática é um campo rico em teorias foi infelizmente ignorado até por muitos sistematas. O conhecido especialista Wheeler declarou em 1929: “A taxonomia [...] é a única ciência biológica que não tem teoria nenhuma, consistindo meramente de diagnóstico e classificação” (1929: 192).

5. Ver Mayr (1996).
6. Como essa inferência deve ser conduzida é explicado nos livros-texto de taxonomia (Mayr e Ashlock, 1991: 100-5). Dificuldades análogas são encontradas pelos paleontólogos na dimensão tempo.
7. Sloan (1986).
8. Rosen (1979).
9. Mayr (1988a), Coyne et al. (1988).
10. De acordo com Simpson, "a monofilia é a derivação de um táxon, através de uma ou mais linhagens, a partir de um táxon imediatamente ancestral do mesmo nível ou mais baixo" (1961: 124). Essa definição articula o conceito tradicional de monofilia em uso desde Haeckel (1866). Os cladistas transferiram o termo para um modo de descendência (todos os táxons derivados de uma espécie-tronco original), mas, para evitar confusão com o conceito tradicional de monofilia, esse conceito cladístico deveria se chamar holofilia (Ashlock, 1971).
11. Curiosamente, características que de outra forma seriam claramente homólogas algumas vezes derivam de folhetos germinativos diferentes (ver capítulo 8). A derivação a partir de um dado folheto germinativo, portanto, não é necessariamente uma indicação confiável de homologia. A homologia é sempre inferida.
12. Os tratados de Simpson (1961), Mayr (1969), Bock (1977) e Mayr e Ashlock (1991) simplesmente desenvolvem o esquema original de classificação de dois critérios de Darwin.
13. A similaridade é determinada pelo critério tradicional dos taxonomistas, que foi articulado por Whewell (1840: 521) da seguinte maneira: "A Máxima pela qual todos os Sistemas que se professam naturais devem ser testados é esta: que o *arranjo obtido a partir de um conjunto de caracteres deve coincidir com o arranjo obtido a partir de outro conjunto*" (os itálicos são dele). Uma idéia mais ou menos igual foi articulada por Hempel (1952: 53): "[...] nas assim chamadas classificações naturais, as características determinantes são associadas, universalmente ou em uma grande porcentagem dos casos, com outras características, das quais elas são logicamente independentes". Em contraste com a cladística, a classificação tradicional obedece à demanda de Darwin para que "os graus diferentes de modificação que [os ramos divergentes da árvore filogenética] sofreram [...] seja expressa pela ordenação das formas em diferentes gêneros, famílias, seções ou ordens" (1859: 420).
14. Uma categoria mais elevada é definida como uma classe na qual são colocados todos os táxons mais elevados que ocupam o mesmo nível em uma classificação hierárquica. A categoria espécie, por exemplo, é definida pela definição de espécie, hoje em dia mais freqüentemente pela definição biológica de espécie.

15. A falta de correlação entre divergência evolutiva e taxa de especiação também é responsável pela chamada "curva oca" (Mayr, 1969).
16. Mayr (1995).
17. Por exemplo, o clado reconhecido pelos cladistas que leva dos pelicosauros aos mamíferos é primariamente baseado em uma única fenestra temporal lateral inferior. Qualquer classificação baseada em um caractere único, mesmo se adequada à filogenia, resulta em táxons artificiais e heterogêneos. É claro, o clado adquirirá caracteres adicionais no tempo devido etc. etc.
18. Mayr (1995b).
19. Mayr e Bock (1994).
20. Mayr (1982: 239-43), Mayr e Ashlock (1991: 151-6).
21. Uma explicação detalhada das regras da nomenclatura zoológica é dada por Mayr e Ashlock (1991: 383-406).
22. Alguns autores reconhecem um terceiro grupo, os Eocytes. Alguns especialistas em bactérias têm afirmado que as diferenças entre Archaeobacteria e Eubacteria são tão grandes quanto as diferenças entre os Prokaryota e os Eukaryota. Não há mérito algum nessa alegação. A caracterização das bactérias em qualquer livro-texto clássico de microbiologia se aplica igualmente a ambas as subdivisões dos Prokaryota, embora as Archaeobacteria ainda não tivessem sido descobertas naquela época. As Archaeobacteria, independentemente de quão diferentes sejam das Eubacteria, mesmo considerando que o ponto de ramificação desses dois grupos de Prokaryota esteja antes do ponto de ramificação entre os Prokaryota e os Eukaryota, compartilham a maioria de seus caracteres com as Eubacteria e, portanto, não deveriam ser colocadas no mesmo nível taxonômico que os Eukaryota. Rebatizar as Archaeobacteria como Archaea não pode ocultar o fato de que elas são um dos dois ramos das Bacteria.
23. Para mais detalhes, ver Cavalier-Smith (1995a, 1995b) e Corliss (1994).

8. PERGUNTAS DO TIPO "COMO?": A CONSTRUÇÃO DE UM NOVO INDIVÍDUO [PP. 207-37]

1. Ver Needham (1959) para uma excelente apresentação das idéias de Aristóteles.
2. Hoje, diríamos que esses processos dirigidos por programas são teleonômicos, mas não teleológicos.
3. Os alicerces das novas descrições do desenvolvimento dos vertebrados foram lançados por Pander (1817), mas bastante aperfeiçoados e expandidos por Van Baer (1828 ss.).

4. Ovos ricos em vitelo geralmente têm um desenvolvimento bastante diferente de ovos pobres em vitelo, mesmo dentro de um táxon mais elevado. A via de desenvolvimento total é especialmente diferente em organismos com diferentes estágios larvais ou com metamorfose completa. Nos Lepidoptera, por exemplo, e em outros grupos de insetos que têm metamorfose completa, há uma reorganização total durante o estágio de pupa e um novo desenvolvimento das estruturas do adulto a partir dos chamados discos imaginais.

5. Essa *vis essentialis* era, é claro, um *deus ex machina* metafísico, e Haller, um pré-formacionista, tinha motivos para perguntar: "Por que um material não formado vindo de uma galinha sempre dá origem a um pintinho e o que vem de uma pavo sempre dá origem a um pavão? Para essas perguntas não foi dada nenhuma resposta".

6. Moore (1993: 445-56) fornece um sumário excelente dessas pesquisas.

7. Logo foi sugerida uma conexão entre a ontogenia e a filogenia, com o estágio de gástrula correspondendo ao tipo dos celenterados e os estágios posteriores do desenvolvimento representando os "tipos" dos organismos "superiores". Haeckel, mais do que qualquer pessoa, enfatizou tal aspecto de recapitulação do desenvolvimento e propôs a teoria da gastraea para a evolução dos invertebrados.

8. Saha (1991: 106).

9. Não só os genes são composições, consistindo em éxons que são transcritos e de íntrons que são cortados da síntese de proteínas, mas além dos genes estruturais, que produzem enzimas, há também genes reguladores e seqüências-flanco. Tudo isso é um maquinário complexo demais para ser descrito em detalhe neste volume, e preciso remeter à literatura especializada, como *Biologia molecular da célula* (Alberts et al., 1983).

10. Isso foi ressaltado especialmente por Severtsov e sua escola (Schmalhausen).

11. Quão bem eles sabiam que os embriões não correspondiam aos estágios adultos dos ancestrais é algo claramente enunciado nos escritos de Haeckel e outros.

12. Mayr (1954).

13. Para estudos mais detalhados do desenvolvimento, recomendo Davidson (1986), Edelman (1988), Gilbert (1991), Hall (1992), Horder et al. (1986), McKinney et al. (1991), Moore (1993), Needham (1959), Russell (1916), Slack et al. (1993) e Walbot et al. (1987).

9. PERGUNTAS DO TIPO "POR QUÊ?": A EVOLUÇÃO DOS ORGANISMOS [PP. 238-77]

1. A origem da vida é um processo químico, que envolveu autocatálise e algum fator direcionador. Como Eigen mostrou, parece que alguma seleção prebiótica esteve envolvida, independentemente de qual via específica se postule para a origem da vida. Para detalhes, ver Shapiro (1986) e Eigen (1992).

2. Alfred Russel Wallace propôs que mecanismos de isolamento eram produzidos pela seleção natural, mas Darwin se opôs vigorosamente a essa idéia. Até o presente, há dois campos nessa questão, consistindo em seguidores de Darwin e de Wallace. Dobzhansky seguiu Wallace, enquanto H. J. Muller e Mayr seguiram Darwin.

3. Ver Alexander (1987), Trivers (1985) e Wilson (1975).

4. Essa abordagem foi adotada por Rensch (1939, 1943) e Simpson (1944), que mostraram que os fenômenos macroevolutivos poderiam ser considerados consistentes com as descobertas da genética. Em particular, era possível explicar todas as assim chamadas leis evolutivas, como a lei de Cope ou a lei de Dollo, em termos de variação e seleção.

5. Mayr (1954: 206-7). Ver também p. 234, acima.

10. QUE PERGUNTAS FAZ A ECOLOGIA? [PP. 278-302]

1. A heterogeneidade do tema assinalado sob o nome ecologia é algo reconhecido há muito tempo. É por isso que hoje existem textos separados para ecologia evolutiva, ecologia comportamental, biologia de populações, limnologia, ecologia marinha e paleoecologia. Somando-se a essa diversidade há, ainda, grandes diferenças na ecologia dos diversos grupos de animais, plantas e microrganismos, e também dos domínios ambientais. A ecologia terrestre é muito diferente da ecologia de água doce (limnologia) e da ecologia marinha. A ecologia do plâncton, fundada por V. Hensen, tornou-se uma ciência próspera e de grande importância para a pesca. Quem quiser ser um ecólogo completo precisa se familiarizar com uma ampla gama de assuntos de estudo. Essa diversidade é parte da razão para as numerosas dificuldades encontradas na pesquisa ecológica, como será discutido nas próximas seções. Há várias investigações sobre o conhecimento ecológico ou da história natural em certos períodos, como as de Cittadino (1990) e de Egerton (1968, 1975).

E é verdade nessa área, como às vezes se diz, que tudo interage com tudo. O todo, hoje chamado ecologia, "é mantido coeso mais pela adoção de um nome comum e da união das sociedades profissionais do que por uma filosofia ou um

princípio comum. Assim, a ecologia impõe dificuldades especiais ao historiador" (Ricklefs, 1985: 799). Existem diversas definições simples de ecologia, tais como "as relações entre os organismos e o seu ambiente", mas isso dá margem a uma enorme gama de inconclusões potenciais. Cada estrutura de um organismo, cada uma de suas propriedades fisiológicas, todo o seu comportamento e, com efeito, quase qualquer componente do fenótipo e do genótipo evoluiu para uma relação ótima do organismo com o seu ambiente.

Como resultado, há vastas áreas de sobreposição entre a ecologia e outras disciplinas biológicas, tais como a biologia evolutiva, a genética, o comportamento e a fisiologia. Por exemplo, no bastante completo texto de ecologia de Ricklefs (1990), seis capítulos inteiros são dedicados a questões evolutivas, capítulos estes que com igual justiça poderiam ser parte de um livro de biologia evolutiva. Diversos textos publicados recentemente foram chamados simplesmente de Ecologia Evolutiva. Eles lidam com tópicos como extinção, adaptação, histórias de vida, sexo, comportamento social e coevolução. Todas as adaptações fisiológicas dos organismos para seu modo especializado de vida ou para os ambientes especializados nos quais eles vivem são consideradas por Ricklefs como áreas de interesse da ecologia. Também o são as adaptações que permitem aos organismos lidar com condições climáticas extremas, como ciclos diários e sazonais, migrações e outras adaptações comportamentais. Há diversos mecanismos fisiológicos a serviço das adaptações ambientais, especialmente para ambientes extremos, como os desertos do Ártico (Schmidt-Nielsen, 1990). A adaptação a condições locais é bem ilustrada no caso das plantas pelo desenvolvimento dos ecótipos.

2. Glacken (1967) nos forneceu uma detalhada documentação dos conceitos humanos de ambiente desde a Antiguidade até o final do século XVIII. Há numerosas investigações sobre o conhecimento ecológico ou de história natural em alguns períodos, como os de Egerton (1968, 1975).

3. Ver Stresemann (1975).

4. Em 1949 foi publicado o livro *Principles of animal ecology*, escrito por vários autores da Escola de Chicago (AEPPS), e daquela data em diante uma torrente de novos livros-texto de ecologia apareceu; nada menos que seis desses textos foram revisados em um único exemplar da *Science* (Orians, 1973). Ocupando um lugar de destaque entre essas obras estavam *Fundamentos de ecologia*, de Odum, publicado em 1953 e amplamente adotado até a década de 1970, e *Ecology*, de Robert Ricklefs (1973), talvez o texto mais usado hoje nos Estados Unidos. O crescimento desse campo é ilustrado pelo fato de que a primeira edição do livro de Odum tinha 384 páginas, enquanto a terceira edição do de Ricklefs (1990) tem 896 páginas. É evidente que apenas uma fração dos aspectos e problemas da ecologia pode ser tratada neste pequeno sumário.

5. A rebelião contra a abordagem puramente descritiva da sistemática e da morfologia, indicada pela prosperidade das pesquisas experimentais em fisiologia e embriologia (*Entwicklungsmechanik*) foi equiparada na história natural por uma ênfase nos relacionamentos entre os organismos vivos. Qualquer coisa que tivesse a ver com o organismo vivo era chamada, em alemão, de *Biologie*, termo que tinha um significado bastante diferente do termo biologia [*biology*], como é usado na literatura de língua inglesa, significando a combinação entre zoologia e botânica. O volume sobre a vida animal (escrito por Doflein) no famoso conjunto de Hesse-Doflein, que foi um sumário esplêndido do conhecimento dominante sobre os animais e as plantas vivas, foi fortemente influenciado pelo pensamento darwinista. Esta *Biologie* enxergava a si própria como uma alternativa e uma complementação à morfologia, o estudo das "estruturas mortas". Seu objeto de estudos era mais ou menos aquilo que os modernos livros-texto tratam sob o chapéu de ecologia comportamental e evolutiva. Essa biologia lidava quase exclusivamente com animais.

6. Ver Kingsland (1985).

7. Historicamente, a biologia de populações havia muito era considerada um ramo independente da biologia, mas hoje está claro que ela é um ramo da ecologia, como foi enfatizado especialmente pelo Simpósio de Cold Spring Harbor de 1957.

8. V. C. Wynne-Edwards (1962, 1986).

9. O que sobrou da relação próxima entre a taxonomia e a ecologia foi tratado por um grande número de publicações, por exemplo, por Heywood (1973).

10. Às vezes os ecólogos aplicam o termo "população" a conjuntos formados por múltiplas espécies em um ecossistema. Eles podem estar falando da população de plâncton em um lago ou da população de herbívoros em uma savana. Na maioria dos casos, tal uso do termo população é enganoso.

11. Houve um desenvolvimento menor de um interesse semelhante nos animais, refletido na publicação *Tiergeographie auf Ökologischer Grundlage*, de R. Hesse (1924). Apesar do título, esta não era uma geografia animal [*Tiergeographie*] que lidava com a distribuição dos animais e com as causas de suas distribuições, e sim uma obra de ecologia animal, esta afetada por fatores geográficos. Em alguns aspectos, esse livro foi um sucessor da morfologia ecológica de Semper (1881). No devido tempo, a ecologia de comunidades deu origem à ecologia dos ecossistemas (ver abaixo).

12. "A formação do clímax é o organismo adulto, a comunidade plenamente desenvolvida."

13. Ver Mayr (1941), MacArthur e Wilson (1963) e Mayr (1965).

11. QUAL É O LUGAR DO HOMEM NA EVOLUÇÃO? [PP. 303-30]

1. Estas duas últimas espécies às vezes são classificadas em um gênero separado, o *Paranthropus*.

2. Com o *robustus* restrito ao sul da África e o *boisei* ao oeste da África, é impossível dizer qual deles é morfologicamente mais parecido com o seu ancestral comum, embora a idade maior do *A. aethiopicus* sugira que o *A. robustus* seja mais derivado em muitos aspectos.

3. As evidências de uma ramificação recente da linhagem dos homínídeos a partir da dos chimpanzés têm ficado paulatinamente melhores. Elas começaram com um trabalho com proteínas do sangue (Goodman), seguido por testes de hibridização de DNA feitos por Sibley e Ahlquist, confirmados depois por Caccone e Powell (com métodos aprimorados), e finalmente por outros métodos moleculares e cromossomos.

4. Sarich (1967) foi o primeiro a propor isso. Outros fósseis são necessários para estabelecer essa data com maior precisão.

5. De forma a tentar organizar o caos então reinante na classificação dos homínídeos (mais de trinta nomes de gênero e cem de espécie), apliquei a navalha de Occam e propus em 1950 que apenas uma espécie de homínídeo vivera no passado, assim como hoje só existe uma espécie de *Homo*. Pesquisas posteriores mostraram que minha proposta era uma simplificação exagerada.

6. Ver Mayr (1954).

7. Ver Stanley (1992).

8. Donald (1991).

9. Ver Mayr (1963: 650).

10. Mitton (1977).

11. Mayr (1963: 623-4).

12. Haldane (1949).

12. PODE A EVOLUÇÃO EXPLICAR A ÉTICA? [PP. 331-58]

1. "Tudo o que sabemos [...] [mostra] que, desde os tempos mais remotos, tribos bem-sucedidas suplantaram outras tribos" (1871: 160).

2. O altruísmo nos animais sociais não envolve necessariamente uma desvantagem para o altruísta. Darwin expôs isso muito bem: "Nós já vimos que as ações são consideradas pelos selvagens, e provavelmente o eram pelo homem primitivo, como sendo boas ou más somente quando elas afetam de maneira óbvia o bem-estar da tribo" (1871: 96). Darwin expressou a relação próxima entre a

sociabilidade e as normas éticas ao declarar "que o assim chamado senso moral é derivado dos instintos sociais" (1871: 97).

3. De Waal (1996).

4. Wilson (1993) nos deu uma excelente apresentação das evidências em favor de um senso moral nos seres humanos. Ver Bradie (1994).

5. Sulloway (1996).

6. Kohlberg (1981; 1984).

7. O tópico evolução e ética produziu uma copiosa quantidade de literatura ao longo dos últimos vinte anos, literatura esta estimulada em grande parte por *Sociobiology*, de E. O. Wilson (1975). Autores além de Wilson que deram grandes contribuições ao tema são R. D. Alexander, A. Gewirth, R. J. Richards, M. Ruse e G. C. Williams. Apresentações de suas visões, com bibliografias de seus escritos, assim como vários ensaios clássicos (T. H. Huxley, J. Dewey) e dez ensaios de outros autores, estão publicados no volume *Evolutionary ethics*, organizado por Nitecki e Nitecki (1993). Esta é uma introdução bastante útil à literatura em ética evolutiva.

Bibliografia

- ADANSON, M. *Familles des plantes*. Paris, 1763.
- AGAR, W. E. "The wholeness of the living organism". *Phil. Sci.* 15: 179-91, 1948.
- ALBERTS, B., D. BRAY, J. LEWIS, K. ROBERTS, J. WATSON. *Molecular biology of the cell*. 1ª. ed. Nova York e Londres: Garland, 1983 [*Biologia molecular da célula*. Porto Alegre: Artmed, 2004].
- ALEXANDER, R. D. *The biology of moral systems*. Hawthorne, N.Y.: Aldine de Gruyter, 1987.
- ALEE, W. C., A. E. EMERSON, O. PARK, T. PARK, K. P. SCHMIDT. *Principles of animal ecology*. Filadélfia: Saunders, 1949.
- ALLEN, G. E. *Life science in the twentieth century*. Nova York: John Wiley & Sons, 1975.
- ALVAREZ, L. "Asteroid theory of extinctions strengthened". *Science* 210: 514, 1980.
- ASHLOCK, P. "Monophyly and associated terms". *Syst. Zool.* 21: 430-8, 1971.
- VERY, O. T., C. M. MACLEOD, M. MCCARTY. "Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types". *J. Exp. Med.* 79: 137-58, 1944.
- AYALA, F. J. "The biological roots of morality". *Biol. and Phil.* 2: 235-52, 1987.
- AYALA F. J., A. ESCALANTE, C. O'HUIGIN, J. KLEIN. "Molecular genetics of speciation and human origins". *Proc. Nat. Ac. Sci.* 91: 6787-94, 1994.
- BAER, K. E. von. *Entwicklungsgeschichte der Thiere: Beobachtung und Reflexion*. Königsberg: Bornträger, 1828.
- BAKER, J. R. "The evolution of breeding season". Em G. R. de BEER, ed., *Evolution: Essays on aspects of evolutionary biology*, pp. 161-77. Oxford: Clarendon Press, 1938.
- BAKER, J. R. "The cell theory: a restatement, history, and critique". *Quart. J. Microscopical Science* 89: 103-23; 90: 87-108; 93: 157-90; 96: 449, 1948-55.
- BARRETT, P. H., P. J. GAUTREY, S. HERBERT, D. KOHN, S. SMITH. *Charles Darwin's notebooks*, 1836-44. Ithaca: Cornell University Press, 1987.
- BATES, H. W. "Contributions to an insect fauna of the Amazon valley". *Trans. Linn. Soc. London* 23: 495-566, 1862.
- BATESON, P., ed. *Mate choice*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- BEATTY, J. "The evolutionary contingency thesis". Em G. WOLTERS & J. LENNOX, eds., *Concepts, theories, and rationality in the biological sciences*, pp. 45-81. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1995.
- BECKNER, M. *The biological way of thought*. Nova York: Columbia University Press, 1959.
- _____. "Organismic biology". Em *Encyclopedia of philosophy*, vol. 5. pp. 549-51, 1967.
- BERTALANFFY, L. von. *Problems of life*. Londres: Watts, 1952.
- BLANDINO, G. *Theories on the nature of life*. Nova York: Philosophical Library, 1969.
- BLUMENBACH, J. F. *Beyträge zur Naturgeschichte*. Göttingen, 1790.
- BOCK, W. "Foundations and methods of evolutionary classification". Em M. HECHT, C. GOODY, B. M. HECHT, eds., *Major patterns in vertebrate evolution*, pp. 851-95. Nova York: Plenum Press, 1977.
- BOWLER, P. J. *The eclipse of Darwinism: Anti-Darwinian evolution theories in the decades around 1900*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1983.
- BOVERI, T. "Über den Einfluss der Samenzelle auf die Larvencharaktere der Echiniden". *Roux's Arch.* 16: 356, 1903.
- BRADIE, M. *The secret chain*. Albany: State University of New York Press, 1994.
- BUFFON, G. L. *Histoire naturelle, générale et particulière*. 44 vols. Paris: Imprimerie Royale, puis Plassan, 1749-1804.
- CARR, E. H. *What is history?* Londres: Macmillan, 1961.
- CASSIRER, E. *The problem of knowledge: Philosophy, science, and history since Hegel*. New Haven: Yale University Press, 1950.
- CAVALIER-SMITH, T. "Membrane heredity, symbiogenesis, and the multiple origins of algae". Em ARAI, KATO, & DIO, eds., *Biodiversity and evolution*, pp. 69-107. Tóquio: Fundação Museu Nacional de Ciências, 1995.
- _____. "Evolutionary protistology comes of age: biodiversity cell biology". *Arch. Protistenkd* 145: 145-54, 1995.
- CITTADINO, E. *Nature as the laboratory*. Nova York: Columbia, 1990.
- CHURCHILL, F. B. "Sex and the single organism: biological theories of mid-nineteenth century". *Stud. Hist. Biol.* 3: 139-77, 1979.
- CODE. *International code of zoological nomenclature*. Adotado pela Assembléia Geral da União Internacional das Ciências Biológicas. Berkeley: University of California Press, 1985.

- COLEMAN, W. "Cell nucleus and inheritance: an historical study". *Proc. Amer. Philos. Soc.* 109: 124-58, 1965.
- COON, C. *The origin of races*. Nova York: Alfred A. Knopf, 1962.
- CORLISS, J. O. "An interim utilitarian ('user-friendly') hierarchical classification of the protista". *Acta Protozoologica*, 33: 1-51, 1994.
- COYNE, J. A., H. A. ORR, D. J. FUTUYMA. "Do we need a new definition of species?". *Syst. Zool.* 37: 190-200, 1988.
- CREMER, T. *Von der Zellenlehre zur Chromosomentheorie*. Berlin: Springer, 1985.
- CRICK, F. *Of molecules and men*. Seattle: University of Washington Press, 1966.
- DARWIN, C. *On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favored races in the struggle for life*. Londres: Murray, 1859. Ed. em fac-simile 1964, ed. E. Mayr.
- _____. *The descent of man*. Londres: Murray, 1871.
- _____. *The correspondence of Charles Darwin*, vol. 9: 269 [carta a Henry Fawcett, 18/9/1861]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- DAVIDSON, E. H. *Gene activity in early development*, 3ª ed. Orlando: Academic Press, 1986.
- DE WAAL, Franz. *Good natured: The origins of right and wrong in humans and other animals*. Cambridge: Harvard University Press, 1996.
- DIAMOND, J. *The third chimpanzee: The evolution and future of the human animal*. Nova York: Harper Collins, 1991.
- DIJKSTERHUIS, E. J. *The mechanization of the world picture*, trans. C. Dikshoorn. Oxford: Clarendon Press, 1961.
- DOBZHANSKY, T. *Genetics and the origin of species*. Nova York: Columbia University Press, 1937.
- _____. "On Cartesian and Darwinian aspects of biology". *Graduate Journal* 8: 99-117, 1968.
- _____. *Genetics of the evolutionary process*. Nova York: Columbia University Press, 1970.
- DOFLEIN, F. *Das Tier als Glied des Naturganzen*. Leipzig: Teubner, 1914.
- DONALD, Merlin. *Origins of the modern mind: Three stages in the evolution of culture and cognition*. Cambridge: Harvard University Press, 1991.
- DRIESCH, H. *Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre*. Leipzig: J. A. Barth, 1905.
- _____. *The science and philosophy of the organism*. Londres: A. & C. Black, 1908.
- DUBOIS-REYMOND, E. "Gedächtnisrede auf Johannes Müller". *Abt. Presa. Akad. Wiss.* 1859: 25-191, 1860.
- _____. *Über die Grenzen des Naturwissenschaftlichen Erkennens*. Leipzig, 1872.
- _____. *Die Sieben Welträtsel*. Leipzig, 1887.
- DUPRÉ, J. *The disorder of things*. Cambridge: Harvard University Press, 1993.

- EDELMAN, G. *Topobiology: An introduction to molecular embryology*. Nova York: Basic Books, 1988.
- EGERTON, F. N. "Studies of animal populations from Lamarck to Darwin". *J. Hist. Biol.* 1: 225-59, 1968.
- _____. "Aristotle's population biology". *Arethusa* 8: 307-30, 1975.
- EIGEN, M. *Steps toward life*. Oxford: Oxford University Press, 1992.
- ELDRIDGE, N. "The allopatric model and phylogeny in Paleozoic invertebrates". *Evolution* 25: 156-67, 1971.
- ELDRIDGE, N., & S. J. GOULD. "Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism". Em Schopf, pp. 82-115, 1972.
- ELTON, C. "Periodic fluctuations in the numbers of animals: their causes and effects". *J. Exper. Biol.* 2: 119-63, 1924.
- _____. *Animal ecology*. Nova York: Macmillan, 1927.
- EVANS, F. C. "Ecosystem as the basic unit in ecology". *Science* 123: 1127-8, 1956.
- FEYERABEND, P. "Explanation, reduction, and empiricism". *Minnesota Studies Philos. Sci.* 2: 28-97, 1962.
- _____. "Against method: Outline of an anarchistic theory of knowledge". *Minnesota Studies Philos. Sci.* 4: 17-130, 1970.
- _____. *Against method*. Londres: Verso, 1975.
- FREGE, G. *Die Grundlagen der Arithmetik: Eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl*. Breslau: W. Koebner, 1884.
- GEOFFROY ST. HILAIRE, E. *Philosophie anatomique*. Paris, 1818.
- GERARD, R. W. "Concepts and principles of biology". *Behavioral Science* 3: 95-102, 1958.
- GHISELIN, M. T. *The triumph of the Darwinian method*. Berkeley: University of California Press, 1969.
- _____. *The economy of nature and the evolution of sex*. Berkeley: University of California Press, 1974.
- _____. "'Definition', 'character', and other equivocal terms". *Syst. Zool.* 33: 104-10, 1984.
- _____. "Individuality, history, and laws of nature in biology". Em M. Ruse, ed., *What the philosophy of biology is*, pp. 3-66. Dordrecht: Kluwer, 1989.
- GIERE, R. N. *Explaining science: A cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- GILBERT, S., ed. *A conceptual history of modern embryology*. Nova York: Plenum, 1991.
- GLACKEN, C. J. *Traces on the Rhodian shore: Nature and culture in Western thought*. Berkeley: University of California Press, 1967.
- GLEASON, H. A. "The individualistic concept of the plant association". *Bull. Torrey Bot. Club* 53: 7-26, 1926.

GOLDSCHMIDT, R. *Physiological genetics*. Nova York: McGraw-Hill, 1938.

_____. "Different philosophies of genetics". *Science* 119: 703-10, 1954.

GOODWIN, B. "Structuralism in biology". *Sci. Progress* (Oxford) 74: 227-44, 1990.

GOUDGE, T. A. *The ascent of life*. Toronto: University of Toronto Press, 1961.

GRAHAM, L. R. *Between science and values*. Nova York: Columbia University Press, 1981.

GAECKEL, E. *Generelle Morphologie der Organismen: Allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von Charles Darwin reformirte Descendenz-Theorie*. 2 vols. Berlin: Georg Reimer, 1866.

_____. "Ueber Entwicklungsgang u. Aufgabe der Zoologie". *Jenaische Z.* 5: 353-70, 1870 (1869).

HALDANE, J. B. S. "Human evolution: past and future". In JEPSEN, MAYR, SIMPSON 1949: 405-18, 1949.

HALDANE, J. S. *The philosophical basis of biology*. Londres: Hodder & Stoughton, 1931.

HALL, B. K. *Evolutionary developmental biology*. Londres: Chapman and Hall, 1992.

HALL, R. *The scientific revolution, 1500-1800*. Londres: Longman, 1954.

HALL, T. S. *Ideas of life and matter*. 2 vols. Chicago: University of Chicago Press, 1969.

HAMILTON, W. D. "The genetical evolution of social behavior". *J. Theoret. Biol.* 7: 1-16; 17-52, 1964.

HANDLER, P., ed. *The life sciences*. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 1970.

HANSON, N. R. *Patterns of discovery*. Cambridge: Cambridge University Press, 1958.

HARAWAY, D. J. *Crystals, fabrics, and fields*. New Haven: Yale University Press, 1976.

HARPER, J. L. *Population biology of plants*. Nova York: Academic Press, 1977.

HARRÉ, R. *Varieties of realism: A rationale for the natural sciences*. Oxford: Oxford University Press, 1986.

HEMPEL, C. G. *Fundamentals of concept formation in empirical science*. Chicago: University of Chicago Press, 1952.

_____. *Aspects of scientific explanation*. Nova York: Free Press, 1965.

HEMPEL, C. G., & P. OPPENHEIM. "Studies in the logic of explanation". *Phil. Sci.* 15: 135-75, 1948.

HENNIG, W. *Grundzüge einer Theorie der Phylogenetischen Systematik*. Berlin: Deutscher Zentralverlag, 1950.

HERTWIG, O. "Beiträge zur Kenntnis der Bildung, Befruchtung und Theilung des thierischen Eies". *Morph. Jahrb.* 1: 347-434, 1876.

HESSE, R. *Tiergeographie auf Ökologischer Grundlage*. Jena: Fischer, 1924.

HEYWOOD, V. H. *Taxonomy and ecology: Proceedings of an international symposium held at the Dept. of Botany, University of Reading*. Nova York: Systematics Association by Academic Press, 1973.

HOLTON, G. *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein*. Cambridge: Harvard University Press, 1973.

HORDER, T. J., H. A. WITKOWSKI, C. C. WYLIE, eds. *A history of embryology*. Nova York: Cambridge University Press, 1986.

HOYNINGEN-HUENE, P. *Reconstructing scientific revolutions: Thomas S. Kuhn's philosophy of science*. Chicago: University of Chicago Press, 1993.

HUGHES, A. *A history of cytology*. Londres & Nova York: Abelard-Schuman, 1959.

HULL, D. L. "Central subjects and historical narratives". *History and theory* 14: 253-74, 1975.

_____. *Science as a process: An evolutionary account of the social and conceptual development of science*. Chicago: University of Chicago Press, 1988.

HUMBOLDT, A. von. *Essay sur la géographie des plantes*. Paris, 1805.

HUXLEY, J. S. *Evolution, the modern synthesis*. Londres: Allen & Unwin, 1942.

HUXLEY, T. H. *Evidence as to man's place in nature*. Londres: William and Norgate, 1863.

_____. *Evolution and ethics*. Romanes Lecture. Londres: Oxford University Press, 1893.

JACOB, Francois. *The logic of life: A history of heredity*. Nova York: Pantheon, 1973.

_____. "Evolution and tinkering". *Science* 196: 1161-6, 1977.

JEPSEN, G. L., E. MAYR, G. G. SIMPSON. *Genetics, paleontology, and evolution*. Princeton: Princeton University Press, 1949.

JOHANNSEN, W. *Elemente der Exakten Erblichkeitslehre*. Jena: Gustav Fischer, 1909.

JUNKER, Thomas. "Darwinismus, materialismus und die revolution von 1848 in Deutschland. Zur interaktion von politik und wissenschaft". *Hist. Phil. Life Sci.* 17: 271-302, 1995.

KAGAN, J. *Unstable ideas*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1989.

_____. *Galen's prophesy: Temperament in human nature*. Nova York: Basic Books, 1994.

KANT, I. *Kritik der Urteilkraft*. Berlin, 1790.

KIMURA, M. *The neutral theory of molecular evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

KINGSLAND, S. E. *Modeling nature: Episodes in the history of population ecology*. Chicago: University of Chicago Press, 1985.

KITCHER, P. *The advancement of science*. Nova York: Oxford University Press, 1993.

KITCHER, P., & W. L. SALMON, eds. *Scientific explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989.

- KOHLBERG, L. *The philosophy of moral development: Moral stages and the idea of justice*. Nova York: Harper & Row, 1981.
- _____. *The psychology of moral development: The nature and validity of moral stages*. San Francisco: Harper & Row, 1984.
- KÖLLIKER, A. von. *Beiträge zur Kenntniss der Geschlechtsverhältnisse und der Samenflussigkeit wirbelloser Thiere, nebst einem Versuch über das Wesen und die Bedeutung der sogenannten Samenthier*. Berlin: W. Logier, 1841.
- _____. "Das Karyoplasma und die Vererbung". Em *Kritik der Weismann'schen Theorie von der Continuität des Keimplasma*. Leipzig, 1886.
- KOLREUTER, J. G. 1760. Ver Mayr 1986a.
- KORSCHOLT, E. *Lebensdauer Altern und Tod*. Jena: Gustav Fisscher, 1922.
- KUHN, T. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press, 1962.
- _____. *Reflections on my critics*. Em Lakatos & Musgrave, pp. 231-78, 1970.
- LA METTRIE, J. O. de. *L'homme machine*. Leyden: Elie Luzac, 1748.
- LACK, D. *The natural regulation of animal numbers*. Oxford: Clarendon Press, 1954.
- LAKATOS, L., & A. MUSGRAVE, eds. *Criticism and the growth of knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press, 1970.
- LAMARCK, J. B. *Philosophie zoologique, ou exposition des considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux*. Paris, 1809.
- LAUDAN, L. "Theories of scientific method from Plato to Mach". *Hist. Sci.* 7: 1-63, 1968.
- _____. *Progress and its problems: Towards a theory of scientific growth*. Berkeley: University of California Press, 1977.
- LENOIR, T. *The strategy of life*. Dordrecht: D. Reidel, 1982.
- LEPLIN, J., ed. *Scientific realism*. Berkeley: University of California Press, 1984.
- LIEBIG, J. *Ueber Francis Bacon von Verulam und die Methode von Naturforschung*. Munique: J. G. Cotta, 1863.
- LINDEMAN, R. L. "The trophic-dynamic aspect of ecology". *Ecology* 23: 399-418, 1942.
- LORENZ, K. "The fashionable fallacy of dispensing with description". *Naturwiss.* 60: 1-9, 1973.
- LOYD, E. *The structure of evolutionary theory*. Westport, Conn.: Greenwood Press, 1987.
- LYELL, C. *Principles of geology, being an attempt to explain the former changes of the earth's surface, by reference to causes now in operation*. 3 vols. Londres, 1830-3.
- MACARTHUR, R. H., & E. O. WILSON. "An equilibrium theory of insular zoogeography". *Evolution* 17: 373-87, 1963.

- MAGNOL, P. *Prodromus historiae generalis plantarum in quo familiae plantarum per tabulas disponuntur*. Montpellier, 1689.
- MAIER, A. *Die Mechanisierung des Weltbildes*. Forschungen zur Geschichte der Philosophie und der Pädagogik. Leipzig, 1938.
- MAINX, F. "Foundations of biology". *Int. Encycl. Unif. Sci.* 1: 1-86, 1955.
- MAY, R. M. *Stability and complexity in model ecosystems*. Princeton: Princeton University Press, 1973.
- MAYNARD-SMITH, J., Jr. "Science and myth". *Natural History* 11: 11-24, 1984.
- MAYR, E. "The origin and life history of the bird fauna of Polynesia". *Proc. Sixth Pacific Sci. Congress*. 4: 197-216, 1941.
- _____. *Systematics and the origin of species*. Nova York: Columbia University Press, 1942.
- _____. "History of the North American bird fauna". *The Wilson Bulletin* 58: 3-41, 1946.
- _____. "The problem of land connections across the South Atlantic, with special reference to the Mesozoic". *Bulletin of the American Museum of Natural History* 99: 85, 255-8, 1952.
- _____. "Change of genetic environment and evolution". Em J. HUXLEY, A. C. HARDY, E. B. FORD, eds., *Evolution as a process*. Londres: Allen & Unwin, pp. 157-80, 1954.
- _____. "Cause and effect in biology: kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist". *Science* 134: 1501-6, 1961.
- _____. *Animal species and evolution*. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1963.
- _____. "The new versus the classical in science". *Science* 141, n°3583: 765, 1963.
- _____. "Introduction". Em C. Darwin, *On the origin of species: A facsimile of the first edition*, pp. vii-xxv. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- _____. "Avifauna: turnover on islands". *Science* 150: 1587-8, 1965.
- _____. *Principles of systematic zoology*. Nova York: McGraw-Hill, 1969.
- _____. "The nature of the Darwinian revolution: acceptance of evolution by natural selection required the rejection of many previously held concepts". *Science* 176: 981-9, 1972.
- _____. *Evolution and the diversity of life: Selected essays*. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1976.
- _____. *The growth of biological thought: Diversity, evolution, and inheritance*. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1982 [O desenvolvimento do pensamento biológico: Diversidade, evolução e herança. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1998].
- _____. "Joseph Gottlieb Kölreuter's contributions to biology". *Osiris* 2d ser. 2: 135-76, 1986.

- MAYR, E. "Natural selection: the philosopher and the biologist". *Resenha de Sober. Paleobiology* 12: 233-9, 1986.
- _____. "The why and how of species". *Biol. and Phil.* 3: 431-41, 1988.
- _____. "Speciational evolution or punctuated equilibria". *Journal of Social and Biological Structures* 12: 137-58, 1989.
- _____. "Plattentektonik und die Geschichte der Vogelfaunen". Em R. van den ELZEN, K.-L. SCHUCHMANN & K. SCHMIDT-KOENIG, eds., *Current topics in avian biology*, pp. 1-17. Proceedings of the International Centennial Meeting of the Deutsche Ornithologen-Gesellschaft, Bonn 1988. Bonn: Verlag der Deutschen Ornithologen-Gesellschaft, 1990.
- _____. *One long argument: Charles Darwin and the genesis of modern evolutionary thought*. Cambridge: Harvard University Press, 1991.
- _____. "The ideological resistance to Darwin's theory of natural selection". *Proceedings of the American Philosophical Society* 135: 123-39, 1991.
- _____. "The idea of teleology". *Journal of the History of Ideas* 53: 117-35, 1992.
- _____. "Darwin's principle of divergence". *Journal of the History of Biology* 25: 343-59, 1992.
- _____. "Darwin's impact on modern thought". *Proceedings of the American Philosophical Society* 139(4): 317-25, 1995. (Lido em 10/11/1994.)
- _____. "Systems of ordering data". *Biol. and Phil.*: 10(4): 419-34, 1995.
- _____. "What is a species and what is not?". *Phil. of Sci.* 63(2): 261-76, 1996.
- MAYR, E., & P. Ashlock. *Principles of systematic zoology*, rev. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1991.
- MAYR, E., & W. Bock. "Provisional classifications v standard avian sequences: heuristics and communication in ornithology". *Ibis* 136: 12-8, 1994.
- MAYR, E., & J. Diamond. *The birds of Northern Melanesia*. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- MCKINNEY, M. L., & K. J. MCNAMARA. *Heterochrony: The evolution of ontogeny*. Nova York: Plenum, 1991.
- MCLAUGHLIN, P. "Newtonian biology and Kant's mechanistic concept causality". Em G. FUNKE, ed., *Akten Siebenten International Kant Kongress*, pp. 57-66. Bonn: Bouvier, 1991.
- MCMULLIN, E., ed. *Construction and constraint: The shaping of scientific rationality*. Notre Dame, Ind.: Notre Dame University Press, 1988.
- MEDAWAR, P. B. *The limits of science*. Oxford: Oxford University Press, 1984.
- MENDEL, J. G. "Versuche über Pflanzen-hybriden". *Verh. Natur. Vereins Brünn* 4(1865): 3-57, 1866.
- MERRIAM, C. H. "Laws of temperature control of the geographic distribution of terrestrial animals and plants". *Nat. Geogr. Mag.* 6: 229-38, 1894.
- MEYER, F. J. F. *Neues System der Pflanzenphysiologie*. 3 vols. Berlin: Haude und Spenersche Buchhandlung, 1837-9.
- MICHENER, C. D. "Discordant evolution and the classification of allodapine bees". *Syst. Zool.* 26: 32-56; 27: 112-8, 1977.
- MILKMAN, R. D. "The genetic basis of natural variation III". *Genetics* 46: 25-38, 1961.
- MILLER, S. J. "A production of amino acids under possible primitive earth conditions". *Science* 117: 528, 1953.
- MITTON, J. B. "Genetic differentiation of races of man as judged by single-locus or multiple-locus analyses". *Amer. Nat.* 111: 203-12, 1977.
- MOORE, J. A. *Science as a way of knowing*. Cambridge: Harvard University Press, 1993.
- MORGAN, C. L. *Emergent evolution*. Londres: William and Norgate, 1923.
- MÜLLER, G. H. "First use of *biologie*". *Nature* 302: 744, 1983.
- MUNSON, R. "Is biology a provincial science?". *Phil. Sci.* 42: 428-47, 1975.
- NAGEL, E. *The structure of science: Problems in the logic of scientific explanation*. Nova York: Harcourt, Brace & World, 1961.
- NÄGELI, C. W. "Über die gegenwärtige Aufgabe der Naturgeschichte, insbesondere der Botanik". *Zeitschr. Wiss. Botanik*, vols. 1-2. Zurich, 1845.
- _____. *Mechanisch-physiologische Theorie der Abstammungslehre*. Leipzig: Oldenbourg, 1884.
- NEEDHAM, J., ed. *Science, religion and reality*. Londres: The Sheldon Press, 1925.
- _____. *A history of embryology*. 2ª ed. Nova York: Abelard-Schuman, 1959.
- NITECKI, M. H., & D. V. NITECKI. *History and evolution*. Albany: State University of New York Press, 1992.
- _____. *Evolutionary ethics*. Albany: State University of New York Press, 1993.
- NOVIKOFF, A. 1945. "The concept of integrative levels and biology". *Science* 101: 209-15, 1945.
- ODUM, E. P. *Fundamentals of ecology*. Filadélfia: Saunders, 1953 [*Fundamentos de ecologia*. São Paulo: Thomson Pioneira, 2007].
- ORIAN, G. H. "Natural selection and ecological theory". *Amer. Nat.* 96: 257-64, 1962.
- PANDER, H. C. *Beiträge zur Entwicklungsgeschichte des Hühnchens im Eye*. Würzburg, 1817.
- PAPINEAU, D. *Reality and representation*. Oxford: Clarendon Press, 1987.
- PEARSON, K. *The grammar of science*. Londres: W. Scott, 1892.
- PEIRCE, C. S. *The essential writings*, ed. E. C. Moore. Nova York: Harper & Row, 1972.
- POLANYI, M. "Life's irreducible structure". *Science* 160: 1308-12, 1968.
- POPPER, K. *The open society and its enemies*. Londres: Routledge & Kegan Paul, 1952.

- POPPER, K. *Logic of scientific discovery*. Nova York: Harper & Row, 1968.
- _____. *Unended quest: An intellectual autobiography*. La Salle, Ill.: Open Court, 1974.
- _____. *Objective knowledge: An evolutionary approach*. Oxford: Clarendon Press, 1975.
- _____. *Realism and the aim of science*. Nova Jersey: Rowan & Littefield, 1983.
- PUTNAM, H. *The many faces of realism*. La Salle, Ill.: Open Court, 1987.
- REDFIELD, R., ed. "Levels of integration in biological and social sciences". *Biological Symposia VIII*. Lancaster, Pen.: Jacques Cattell Press, 1942.
- REGAL, P. J. "The evolutionary origin of feathers". *Quarterly Review of Biology* 50:35-66, 1975.
- _____. "Ecology and evolution of flowering plant dominance". *Science* 196: 622-9, 1977.
- REMAK, R. "Über extracelluläre Entstehung thierischer Zellen und über Vermehrung derselben durch Theilung". *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin (Müllers Archiv)* 19: 47-72, 1852.
- RENSCH, B. "Typen der Artbildung". *Biol. Reviews (Cambridge)* 14: 180-222, 1939.
- _____. "Die biologischen Beweismittel der Abstammungslehre". Em G. HEBERER, *Evolution der Organismen*, pp. 57-85. Jena: Gustav Fischer, 1943.
- _____. *Neuere Probleme der Abstammungslehre*. Stuttgart: Enke, 1947.
- _____. *Biophilosophie*. Stuttgart: Gustav Fischer, 1968.
- RESCHER, N. *The limits of science*. Berkeley: University of California Press, 1984.
- _____. *Scientific realism: A critical reappraisal*. Dordrecht: Reidel, 1987.
- RICKLEFS, R. E. 1990. *Ecology*, 3ª ed. Nova York: Freeman, 1990 (1ª ed. 1973).
- RITTER, W. E., & E. W. BAILEY. "The organismal conception: its place in science and its bearing on philosophy". *Univ. Calif. Pub. Zool.* 31: 307-58, 1928.
- ROSEN, D. "Fishes from the upland intermountain basins of Guatemala". *Bull. Amer. Mus. Nat. His.* 162: 269-375, 1979.
- ROSENFELD, L. L. *From beast-machine to man-machine*. Nova York: Oxford University Press, 1941.
- ROUX, W. *Über die Kedcutung der Kerntheilungsfiguren*. Leipzig: Engelmann, 1883.
- _____. *Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen*. 2 vols. Leipzig: Engelmann, 1895.
- _____. "Das Wesen des Lebens". *Kultur der Gegenwart* III 4(1): 173-87, 1915.
- RUSE, M. *Sociobiology: Sense or nonsense?* Boston: D. Reidel, 1979 [*Sociobiologia: Senso ou contra-senso?* Belo Horizonte: Itatiaia, 1983].
- _____. *The Darwinian revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 1979.
- RUSSELL, E. S. *Form and function: A contribution to the history of animal morphology*. Londres: J. Murray, 1916.

- RUSSELL, E. S. *The directiveness of organic activities*. Cambridge: Cambridge University Press, 1945.
- SAHA, M. "Spemann seen through a lens". Em S. F. GILBERT, ed., *Developmental biology: A conceptual history of modern embryology*, pp. 91-108. Nova York: Plenum Press, 1991.
- SALMON, W. C. *Scientific explanation and the causal structures of the world*. Princeton: Princeton University Press, 1984.
- _____. *Four decades of scientific explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989.
- SARICH, V. M., & A. C. WILSON. "Immunological time scale for hominid evolution". *Science* 158: 1200-2, 1967.
- SATTLER, R. *Biophilosophy*. Berlim: Springer, 1986.
- SCHLEIDEN, M. J. "Beiträge zur Phylogenesis". *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin (Müllers Archiv)* 5: 137-76, 1838.
- _____. *Grundzüge der wissenschaftlichen Botanik*. Leipzig, 1842.
- SCHMIDT-NIELSEN, K. *Animal physiology: Adaptation and environment*. 4ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- SCHOPF, Thomas J. M., ed. *Models in paleobiology*. San Francisco: Freeman, 1972.
- SCHWANN, Th. *Mikroskopische Untersuchungen über die Übereinstimmung in der Struktur und dem Wachstum der Tiere und Pflanzen*. Berlim, 1839.
- SEMPER, K. G. *Animal life as affected by the natural conditions of existence*. Nova York: Appleton, 1881 [1880 em alemão].
- SEVERTSOFF, A. N. *Morphologische Gesetzmässigkeiten der Evolution*. Jena: Gustav Fischer, 1931.
- SHAPIRO, J. H. *Origins: A skeptic's guide to the creation of life on earth*. Nova York: Summit Books, 1986.
- SHROPSHIRE, W., Jr. *The joys of research*. Washington, D. C.: Smithsonian Institution Press, 1981.
- SIMPSON, G. G. *Tempo and mode in evolution*. Nova York: Columbia University Press, 1944.
- _____. *Principles of animal taxonomy*. Nova York: Columbia University Press, 1961.
- _____. "Biology and ethics". Em G. G. Simpson, ed., *Biology and man*, pp. 130-48. Nova York: Harcourt, Brace and World, 1969.
- SINGER, P. *The expanding circle*. Nova York: Farrar, Straus and Giroux, 1981.
- SLACK, J. M., P. W. HOLLAND, C. F. GRAHAM. "The zootype and phylotypic stage". *Nature* 361: 490-2, 1993.
- SLOAN, P. R. "From logical universals to historical individuals: Buffon's idea of biological species". Em J. ROGER & J. L. FISCHER, eds., *Histoire des concepts d'espèce dans la science de la vie*. Paris: Fondation Singer-Polignac, 1986.

- SMART, J. J. C. *Philosophy and scientific realism*. Londres: Routledge & Kegan Paul, 1963.
- SMUTS, J. C. *Holism and evolution*. Nova York: Viking Press, 1926, 2^a ed. 1965.
- SNOW, C. P. *The two cultures and the scientific revolution*. Nova York: Cambridge University Press, 1959.
- SPEMANN, H. "Über Correlationen in der Entwicklung des Auges". *Verhandl Anat Ges.* 15: 15-79, 1901.
- SPEMANN, H., & H. MANGOLD. "Über Induktion von Embryoanlagen durch Implantation artfremder Organisatoren". *Roux's Archiv* 100: 599-638, 1924.
- STANLEY, S. M. *Macroevolution: Pattern and process*. San Francisco: W. H. Freeman, 1979.
- _____. "An ecological theory for the origin of Homo". *Paleobiology* 18: 237-57, 1992.
- STEBBINS, G. L. *Variation and evolution in plants*. Nova York: Columbia University Press, 1950.
- STENT, G. *The coming of the golden age: A view of the end of progress*. Nova York: Natural History Press, 1969.
- STERN, C. "In praise of diversity". *Am. Zool.* 2: 575-9, 1962.
- _____. "Thoughts on research". *Science* 148: 772-3, 1965.
- STRESEMANN, E. *Ornithology: From Aristotle to the present*. Cambridge: Harvard University Press, 1975.
- SULLOWAY, Frank. *Born to rebel*. Nova York: Pantheon Press, 1996.
- SUPPÉ, F., ed. *The structure of scientific theories*. Urbana: University of Illinois Press, 1974, 2^a ed. 1977.
- TANSLEY, A. G. "The use and abuse of vegetational concepts and terms". *Ecology* 16: 204-307, 1935.
- THAGARD, P. *Conceptual revolutions*. Princeton: Princeton University Press, 1992.
- THOMPSON, P. "Conceptual and logical aspects of the 'new' evolutionary epistemology". *Can. J. Phil.*, vol. sup. 14: 235-53, 1988.
- _____. *The structure of biological theories*. Albany: State University of New York Press, 1989.
- THOREAU, H. D. *Faith in a seed*. Washington, D. C.: Island Press, 1993 [ca. 1856-62].
- THORNTON, Ian. *Krakatau: The destruction and reassembly of an island ecosystem*. Cambridge: Harvard University Press, 1995.
- TREVIÑO, S. *Graincollection: Human's natural ecological niche*. Nova York: Vintage Press, 1991.
- TREVIRANUS, G. R. *Biologie, oder Philosophie der lebenden Natur*. Vol. 1. Göttingen: J. R. Röwer, 1802.

- TRIGG, R. *Reality at risk: A defense of realism in philosophy and the sciences*. 2^a ed. Nova York: Harvester Wheatsheaf, 1989.
- TRIVERS, R. L. *Social evolution*. Menlo Park: Benjamin/Cummings, 1985.
- TSCHULOK, S. *Das System der Biologie in Forschung und Lehre*. Jena: Gustav Fischer, 1910.
- VAN FRAASSEN, B. C. *The scientific image*. Oxford: Clarendon Press, 1980.
- WADDINGTON, C. H. *The ethical animal*. Londres: Allen and Unwin, 1960.
- WALBOT, V. & N. HOLDER. *Developmental biology*. Nova York: Random House, 1987.
- WARMING, J. E. B. *Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie*. Berlin, 1896.
- WEISMANN, A. *Über die Vererbung*. Jena: Gustav Fischer, 1883.
- _____. *Essays upon heredity*. Oxford: Clarendon Press, 1889.
- WEISS, P. "The place of physiology in the biological sciences". *Federation Proceedings* 6: 523-5, 1947.
- _____. "Medicine and society: the biological foundations". *J. Mount Sinai Hospital* 19: 727, 1953.
- WHEELER, W. H. "Present tendencies in biological theory". *Sci. Monthly* 1929: 192, 1929.
- WHEWELL, W. *Philosophy of the inductive sciences founded upon their history*. Vol. 1. Londres: J. W. Parker, 1840.
- WHITE, M. *Foundations of historical knowledge*. Nova York: Harper and Row, 1965.
- WILSON, E. B. *The cell in development and heredity*. 3^a ed. Nova York: Macmillan, 1925.
- WILSON, E. O. *Sociobiology*. Cambridge: Harvard University Press, 1975.
- WILSON, J. Q. *The moral sense*. Nova York: Free Press, 1993.
- WINDELBAND, W. "Geschichte der alten Philosophie: Nebst einem Anhang: Abriss der Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften". *Em Altertum von Siegmund Günter*. 2 vols. Munique: Beck, 1894.
- WOLFF, C. F. *Theoria generationis*. Halle, 1774.
- WOODGER, J. H. *Biological principles: A critical study*. Londres: Routledge and Kegan Paul, 1929.
- WYNNE-EDWARDS, V. C. *Animal dispersion in relation to social behavior*. Edimburgo: Oliver & Boyd, 1962.
- _____. *Evolution through group selection*. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1986.

Glossário

Adaptação [*adaptedness*]. Adequação de uma estrutura ou de um organismo ao seu ambiente ou estilo de vida, como resultado de seleção passada.

Altruísmo. Comportamento que beneficia outro organismo, a algum custo para o ator.

Análise cladística. Análise de caracteres derivados para inferir a sequência de ramificações filogenéticas tendo como base exclusivamente os caracteres derivados.

Animismo. Crença de que fenômenos da natureza são causados por espíritos.

Apomorfia. Estado derivado em uma série evolutiva de caracteres homólogos.

Aptidão [*fitness*]. Capacidade relativa de um organismo de sobreviver e transmitir seus genes para a geração seguinte.

Aptidão inclusiva. Acréscimos à aptidão do genótipo de um indivíduo que são proporcionados pelos genótipos dos parentes mais próximos, em especial de seus ancestrais.

Autecologia. Ecologia das espécies (e dos indivíduos).

Autótrofos. Organismos capazes de produzir seus próprios nutrientes, como as plantas fazem com a ajuda da luz do sol.

Bauplan. Tipo estrutural, como o de um vertebrado ou artrópode.

Biota. Fauna e flora.

Caracteres adquiridos. Características do fenótipo de um organismo que resultam de influências ambientais e não de herança.

Cartesianismo. As crenças, os métodos e a filosofia de Descartes.

Conceito biológico de espécie. Definição de espécie como um grupo reprodutivamente (geneticamente) isolado de populações naturais que se cruzam entre si.

Character. Um componente do fenótipo.

Caracteres homólogos. Traços em dois ou mais táxons que descendem de um mesmo traço em um ancestral comum mais próximo.

Caracteres poligênicos. Aspectos do fenótipo controlados por vários genes.

Catastrofismo. Teoria segundo a qual eventos catastróficos na história da Terra resultaram em extinções parciais ou completas da biota.

Categoria. Na taxonomia, o nível (como espécie, gênero, família ou ordem) atribuído a determinado táxon na hierarquia lineana.

Categoria espécie. Categoria na hierarquia lineana na qual os táxons de espécie são colocados.

Causação evolutiva. Fatores históricos responsáveis pelas propriedades dos indivíduos e das espécies e, mais especificamente, pela composição do genótipo (o programa genético).

Causa funcional. Causa próxima.

Causas próximas. Fatores físicos e químicos responsáveis por processos biológicos, ou seja, pelas atividades resultantes da decodificação do programa genético.

Causas últimas. Causas evolutivas.

Célula germinativa. Um óvulo ou espermatozóide.

Citoplasma. O conteúdo da célula em volta do núcleo.

Cladificação. Sistema de ordenação dos organismos no qual os itens a serem ordenados são ramos da árvore filogenética (ou cladograma); classificação hennigiana.

Clado. Um táxon baseado nos princípios da classificação hennigiana.

Cladograma. As ramificações inferidas da árvore filogenética.

Classificação (darwinista). Ordenamento das espécies ou táxons superiores em grupos (classes) com base tanto na semelhança (grau de divergência evolutiva) quanto da origem comum (genealogia).

Código genético. O código por meio do qual a informação genética contida na sequência de pares de bases do DNA é traduzida em aminoácidos (os tijolos básicos com os quais se constroem as proteínas).

Conceito de espécie. O sentido ou a definição biológica da palavra “espécie”.

Conceito tipológico de espécie. A definição de espécies com base no grau de diferença.

Convergência. Em evolução, diz-se da aquisição independente da mesma característica por duas ou mais linhagens não aparentadas.

Criacionismo. Crença na verdade literal da história da Criação narrada no Livro do Gênesis.

Cromatina. Material do qual os cromossomos são compostos, inclusive o DNA e as proteínas.

Cromossomo. Uma das estruturas em forma de fio no núcleo da célula, que consistem em DNA e proteínas associadas.

Deme. Uma população local de uma espécie; a comunidade de indivíduos potencialmente inter cruzáveis em dada localidade.

Desenvolvimento determinado [determinate development]. Desenvolvimento no qual o destino das células embrionárias é determinado pela sua posição no embrião em desenvolvimento, e cada região do embrião se diferencia de forma quase independente de qualquer influência de outras regiões; também chamado de desenvolvimento em mosaico.

Desenvolvimento em mosaico. Desenvolvimento determinado.

Desenvolvimento regulador [regulative development]. Desenvolvimento do embrião no qual o ambiente celular influencia cada célula.

Determinismo. Teoria segundo a qual o resultado de um processo é estritamente predeterminado por causas definidas e leis naturais, sendo portanto previsível.

Diplóide. Que tem dois conjuntos de cromossomos, um de cada genitor.

Divisão redutiva. Divisão celular na meiose durante a qual o número de cromossomos é reduzido à metade, ou seja, uma célula diplóide dá origem a duas células haplóides.

DNA. Ácido desoxirribonucleico, a molécula que transmite a informação genética.

Dogma central. A asserção, hoje comprovada, de que a informação contida nas proteínas não pode ser traduzida de volta em ácidos nucleicos.

Flutuação genética [genetic drift]. Mudança no conteúdo genético de uma população devido a eventos aleatórios.

Ectoderma. O folheto germinativo externo, que geralmente dá origem à epiderme e ao sistema neural.

Emergência. Ocorrência, em sistemas, de caracteres em níveis de integração mais altos, que não poderiam ter sido previstos a partir do conhecimento de seus componentes no nível mais baixo.

Endoderma. O folheto germinativo mais interno, que geralmente dá origem ao sistema intestinal.

Epigênese. Teoria, hoje desacreditada, segundo a qual novas estruturas se originam durante a ontogenia a partir de material indiferenciado com a ajuda de uma força viral; ver Pré-formação.

Escolha da fêmea. Hipótese segundo a qual é geralmente a fêmea que escolhe um dos vários machos disponíveis para a cópula, e não o contrário; é parte da moderna teoria da seleção sexual.

Especiação alopátrica. Especiação geográfica.

Especiação dicopátrica. Especiação alcançada pela divisão de uma espécie-mãe devido a barreiras geográficas, de vegetação ou outras barreiras extrínsecas.

Especiação geográfica. Especiação que ocorre quando populações se isolam geograficamente; também conhecida como especiação alopátrica.

Especiação parapátrica. Divergência progressiva, em duas espécies, de duas populações que têm uma zona de distribuição geográfica contígua, mas não se cruzam entre si (ou têm uma quantidade mínima de cruzamento) na zona de contato.

Especiação peripátrica. A origem de uma nova espécie por meio da modificação de populações fundadoras periféricamente isoladas (brotamento).

Especiação simpátrica. Especiação sem isolamento geográfico, talvez por especialização ecológica; a aquisição de mecanismos de isolamento em um deme.

Espécie (biológica). Agregado de populações reprodutivamente isoladas que podem se cruzar umas com as outras por compartilharem os mesmos mecanismos de isolamento.

Espécie incipiente. Uma população que está evoluindo a ponto de se tornar uma espécie separada.

Espécie-tronco. Espécie com uma nova apomorfia que dá origem a um novo clado.

Espécies gêmeas [sibling species]. Espécies reprodutivamente isoladas, mas morfologicamente idênticas ou quase idênticas.

Espécies politípicas. Espécies que consistem em várias subespécies.

Essencialismo. Crença de que a variação da natureza possa ser reduzida a um número limitado de classes básicas, representando tipos constantes e bem definidos; pensamento tipológico.

Estampagem [imprinting]. Forma particularmente rápida e irreversível de aprendizado, que armazena informação em um programa aberto.

Estase. Manutenção de um fenótipo constante em uma linhagem evolutiva através do tempo geológico.

Estratigrafia. Estudo dos estratos geológicos, de sua história e das floras e faunas fósseis neles contidas.

Eucariontes. Organismos com um núcleo celular bem desenvolvido; todos os organismos acima do nível dos procariontes.

Evolução especiativa. Evolução rápida de espécies que se originaram de populações fundadoras peripátricas.

Evolução neutra. A ocorrência e acumulação de mutações hereditárias que não alteram a aptidão de um indivíduo ou de sua prole.

Exclusão competitiva. Princípio segundo o qual duas espécies com necessidades ecológicas idênticas não podem coexistir no mesmo lugar; também chamado de princípio de Gause.

Éxon. Sequência de pares de bases em um gene que participa da codificação de proteínas (peptídeos); ver Íntron.

Pecilotérmico [ectotherm]. Organismo cuja temperatura é determinada pela temperatura do seu ambiente.

Fenética. A delimitação e o ordenamento dos táxons estritamente com base na semelhança entre eles, sem avaliar a genealogia.

Fenótipo. A totalidade das características de um indivíduo, resultantes da interação do genótipo com o ambiente.

Filogenia. A via de descendência a partir de um ancestral.

Finalismo. Crença em uma tendência inerente no mundo natural a algum objetivo ou propósito preordenado, como a conquista da perfeição; ver Teleologia.

Fisicalismo. Ênfase (ou crença) em certos princípios dominantes na física clássica, como o essencialismo, o determinismo, o reducionismo e assim por diante.

Gameta. Célula germinativa (óvulo ou espermatozóide) que carrega metade do conjunto de cromossomos de um organismo, especialmente uma célula germinativa madura capaz de participar da fertilização; ver Recombinação genética; Meiose.

Gene. Sequência de pares de bases em uma molécula de DNA que contém a informação para a fabricação de uma molécula de proteína.

Genoma. A totalidade dos genes portados por um único gameta.

Genótipo. A totalidade dos genes (informação genética) de um indivíduo.

Germoplasma. Termo fora de moda que designa o material genético nas células germinativas.

Gradualismo. Teoria segundo a qual a evolução progride pela modificação gradual das populações e não pela origem repentina de novos tipos (saltações).

Grupos irmãos. Grupos originados na divisão de uma linhagem filogenética.

Guilda. Grupo de espécies com necessidades de recursos e técnicas de forrageamento parecidas e que, portanto, têm papéis similares no ecossistema, sendo competidoras potenciais.

Haplóide. Quem tem um único conjunto de cromossomos.

Herança branda. Noção, hoje desacreditada, de que os caracteres adquiridos pelo fenótipo podem ser transmitidos ao genótipo; ver Dogma central.

Herança dos caracteres adquiridos. Teoria, hoje desacreditada, segundo a qual mudanças causadas pelo ambiente no fenótipo de um organismo podem ser passadas à prole através do material genético desse organismo.

Herança particulada. Teoria, hoje comprovada, segundo a qual os materiais genéticos dos genitores não se fundem durante a fertilização, mas permanecem discretos; ver Herança por mistura.

Herança por mistura [blending inheritance]. Noção, hoje desacreditada, de que os materiais genéticos do pai e da mãe se fundem durante a fertilização; ver Herança particulada.

Hibridização de DNA. Método para testar a proximidade do parentesco entre dois táxons.

Homoplasia. Nome dado à posse, por dois ou mais táxons, de um caractere que não é derivado do ancestral comum mais próximo, mas foi adquirido através de convergência, paralelismo ou reversão.

Interações epistáticas. Interações de diferentes *loci* gênicos.

Íntron. Sequência não codificante de pares de bases que é eliminada antes da tradução dos ácidos nucleicos em proteínas (peptídeos); ver Éxon.

Lamarckismo. As teorias evolutivas de Lamarck, em especial a crença na herança dos caracteres adquiridos.

Lei de Meckel-Serrès. Recapitulação.

Macroevolução. A evolução acima do nível de espécie, a evolução dos táxons superiores e a produção de novidades evolutivas, como novas estruturas.

Macrotaxonomia. A classificação dos táxons superiores.

Mecanismos de isolamento. Propriedades genéticas (inclusive comportamentais) dos indivíduos que evitam que populações de diferentes espécies que coexistem numa mesma área se inter cruzem.

Meiose. As duas divisões celulares especiais das células germinativas em formação, caracterizadas pelo pareamento e pela segregação dos cromossomos homólogos; as células germinativas resultantes têm um conjunto haplóide de cromossomos.

Mesoderma. O folheto germinativo intermediário, que dá origem a tecido conjuntivo, músculos e ossos.

Mesozóico. A era geológica que foi de 225 milhões até 65 milhões de anos atrás; a era dos grandes répteis.

Metazoário. Animal multicelular.

Microtaxonomia. Classificação no nível de espécie.

Mimetismo batesiano. Imitação, por uma espécie palatável, da aparência de uma espécie não-comestível ou tóxica.

Mitose. Processo pelo qual uma célula (incluindo seu conjunto de cromossomos) se divide em duas células-filhas.

Monofilia. A descendência de um dado táxon a partir do táxon ancestral comum mais próximo do mesmo nível.

Morfotipo. O tipo estrutural ou bauplan.

Mutação. Uma mudança espontânea ou induzida na sequência de DNA de um gene em um organismo individual; no mais das vezes, mutações se originam em um erro de replicação do DNA.

Nicho. O espaço multidimensional onde uma espécie obtém seus recursos; as necessidades ecológicas dessa espécie.

Ontogenia. Desenvolvimento de um indivíduo a partir de um óvulo fertilizado (zigoto) até a fase adulta.

Organicismo. Crença de que as características únicas dos seres vivos não se devem à sua composição, e sim à sua organização.

Origem comum [*common descent*]. A derivação das espécies ou táxons superiores de um ancestral comum.

Ortogênese. Crença em uma força ou tendência intrínseca que conduz uma linhagem filogenética rumo a um objetivo predeterminado, ou ao menos a uma maior perfeição.

Pangênese. Teoria que tenta explicar a herança dos caracteres adquiridos ao propor que pequenos grânulos (gêmulas, pangenes) migram de todas as partes do corpo para as gônadas, onde são incorporados aos gametas.

Parafilético. Um táxon que inclui uma linhagem que leva a um táxon derivado.

Parcimônia. Em taxonomia, o princípio segundo o qual a árvore mais curta, ou seja, a que tem o menor número de pontos de ramificação (mudanças de caractere), é a melhor.

Par de bases. Um par de bases nitrogenadas (uma purina e uma pirimidina) unidas por uma ponte de hidrogênio que conecta as duas fitas da dupla-hélice do DNA.

Partenogênese. Produção de filhotes a partir de óvulos não-fertilizados.

Pensamento populacional. Ponto de vista que enfatiza que cada indivíduo numa população de uma espécie que se reproduz sexuadamente é único e que, portanto, leva em conta a real variabilidade de uma população; o oposto do essencialismo e do pensamento tipológico.

Pensamento tipológico. Essencialismo.

Pleiotrópico. Um gene que afeta vários caracteres fenotípicos.

Plesiomórfico. Um estado de caractere ancestral (primitivo, patristico).

Poliploidia. A posse de mais de dois conjuntos haplóides de cromossomos.

Pontualismo. Teoria segundo a qual a maioria dos eventos evolutivamente importantes acontece durante picos curtos de especiação e, uma vez que as espécies se formam, elas são relativamente estáveis, às vezes durante períodos muito longos.

População fundadora. População fundada por uma única fêmea (ou por um pequeno número de conspecíficos) além do limite prévio da espécie.

Pré-formação. Teoria, hoje desacreditada, segundo a qual um embrião se desenvolve a partir de um material no qual a forma básica de um adulto é “pré-formada”, ou seja, já existe em suas estruturas essenciais; ver Epigênese.

Primata. Membro da ordem de mamíferos que inclui os lêmures, os macacos e os grandes macacos [*apes*].

Procariontes. Organismos de uma célula só que não têm um núcleo estruturado, como os vários tipos de bactérias.

Processos estocásticos. Eventos aleatórios.

Programa aberto. Um conjunto de tecidos capaz de incorporar e reter instruções que influenciam seu desenvolvimento e suas atividades.

Programa adaptacionista. Esforço de pesquisa para descobrir a importância adaptativa de estruturas, processos e atividades.

Programa genético. A informação codificada no DNA de um organismo.

Programa somático. No desenvolvimento, nome dado à informação contida nos tecidos adjacentes que pode influenciar ou controlar o desenvolvimento posterior de uma estrutura ou um tecido embrionário.

Processo teleonômico. Processo ou comportamento que deve seu direcionamento à operação de um programa.

Protistas. Conjunto heterogêneo de eucariontes unicelulares.

Recapitulação. Teoria segundo a qual os organismos recapitulam, durante a sua ontogenia, os estágios filogenéticos pelos quais seus ancestrais passaram; também conhecida como lei de Meckel-Serrès.

Recombinação genética. O embaralhamento dos genes de um organismo durante a meiose; ela assegura que os cromossomos que os óvulos ou os espermatozóides de um organismo carregam não são idênticos aos cromossomos que esse organismo herdou de seus genitores, e que não haja dois cromossomos idênticos em qualquer um dos óvulos ou dos espermatozóides.

Reduccionismo. Filosofia que postula que todos os fenômenos e leis relacionados com eventos complexos (incluindo os do mundo vivo) podem ser explicados ao serem reduzidos aos seus menores componentes, e que o nível de integração desses sistemas pode ser completamente explicado ao se conhecerem os menores componentes.

Reprodução assexuada. Qualquer forma de propagação que não resulta da fusão de dois gametas.

Reversão. reaparecimento, na filogenia, de um caractere ancestral como resultado da perda de um caractere derivado (apomórfico).

Saltacionismo. Crença de que a mudança evolutiva é resultado da origem repentina de um novo tipo de indivíduo, que se torna progenitor de um novo tipo de organismo.

Scala naturae. Um arranjo linear das formas da vida que vai da mais baixa, quase inanimada, até a mais perfeita; a escala da perfeição.

Seleção artificial. Seleção de reprodutores por um criador de animais ou de plantas.

Seleção por parentesco. Em indivíduos ligados por um ancestral comum, a seleção dos componentes compartilhados de seu genótipo.

Seleção natural. A sobrevivência e sucesso reprodutivo não-aleatórios de uma pequena porcentagem dos indivíduos de uma população que têm, e em determinado momento, os caracteres que aumentam sua chance de sobreviver e de se reproduzir.

Seleção sexual. A seleção de caracteres que aumentam o sucesso reprodutivo.

Síntese evolucionista. Período entre 1937 e 1950, no qual foi estabelecida uma unidade conceitual entre os evolucionistas, baseada essencialmente no paradigma darwinista, incluindo a seleção natural, a adaptação e o estudo da diversidade.

Sinecologia. Ecologia das comunidades e dos ecossistemas.

Sistemática. Ciência que estuda a diversidade dos organismos.

Sociobiologia. Estudo sistemático das bases biológicas do comportamento social, com ênfase especial no reprodutivo.

Táxon. Grupo monofilético de organismos que compartilham um conjunto definido de caracteres e que são distintos o suficiente para merecerem um nome formal.

Taxonomia. Teoria e prática da classificação dos organismos.

Táxons de espécie. Populações ou grupos de populações específicos que atendem à definição de espécie.

Táxons holofiléticos. Todos os táxons que descendem de uma única espécie-tronco.

Teleologia. A existência real ou aparente de processos direcionados a um objetivo na natureza e seu estudo.

Teorias autogenéticas. Teorias baseadas em uma crença em forças direcionadas a um objetivo ou em tendências na natureza.

Teologia natural. Estudo da natureza para documentar evidências do poder e da visão do Criador no planejamento do mundo.

Tipos naturais. Tipos de organismos definidos pelo conceito tipológico de espécie.

Transpósons. Genes que saltam de um cromossomo para o outro.

Uniformitarismo. Teoria promovida especialmente pelo geólogo Charles Lyell segundo a qual todas as mudanças na natureza são graduais, especialmente as geológicas; o oposto do catastrofismo.

Variante. Membro de uma população variável.

Vicariância. A existência de formas proximamente aparentadas (vicariantes) em áreas geográficas não conectadas, que foram secundariamente isoladas pela formação de uma barreira natural.

Vitalismo. Crença de que os organismos vivos têm uma força especial ou substância vital que não pode ser encontrada na matéria inerte.

Zigoto. Óvulo fertilizado; o indivíduo que resulta da união de dois gametas e seus núcleos.

Zona adaptativa. Um espaço contendo recursos no ambiente ocupado por organismos mais ou menos adaptados a ele.

Agradecimentos

Para produzir este livro tão amplo contei com muita ajuda e estímulo de muitos colegas. Walter J. Bock leu todo o manuscrito de uma versão anterior e de uma posterior, e fez diversas recomendações preciosas. Vários capítulos melhoraram significativamente após revisões críticas de David Pilbeam e Richard Alexander. A área na qual precisei de mais assistência foi a filosofia da ciência. Não é fácil para um cientista atuante seguir a linha de argumentação de várias e muitas vezes discordantes escolas de epistemologia. Os professores Adolf Grünbaum e John Beatty me explicaram pacientemente questões que até então eu não fora capaz de compreender. Também recebi conselhos valiosos de David Hull, Michael Ruse e Robert Brandon. Lamento que algumas de suas sugestões não tenham podido ser incorporadas, devido ao espaço limitado. Devo muito a todos esses amigos.

Boa parte do livro foi escrita durante minhas viagens de inverno ao Sul. Quero expressar meus calorosos agradecimentos ao dr. Ira Rubinoff, diretor do Instituto Smithsonian de Pesquisa Tropical (Smithsonian Tropical Research Institute — STRI), no Panamá, por me aceitar durante vários anos como pesquisador convidado. O dr. John Fitzpatrick e sua

equipe também têm meu sincero obrigado por terem sido meus anfitriões na Estação Biológica Archbold, em Lake Placid, Flórida. Os professores Karl Peters e Dan DeNicola me proporcionaram um local de trabalho no Departamento de Filosofia e Religião no Rollins College, em Winter Park, Flórida; a eles e à reitora do Rollins College, Rita Bornstein, que me indicou como pesquisador visitante Johnston em 1995, quero dizer obrigado novamente pela generosidade que me demonstraram.

Meu falecido secretário Walter Borawski foi mais prestimoso do que nunca durante as primeiras fases de preparação do manuscrito. Tive uma sorte imensa de ter Lisa Reed como sua eficiente e dedicada sucessora; ela não só digitou várias versões do manuscrito e compilou grande parte da bibliografia como também preparou índices remissivos cuidadosos, que ajudaram a eliminar sobreposições entre os capítulos. Chenoweth Moffatt foi responsável por digitar a versão final, completar a bibliografia e aprontar o manuscrito para a editora. Com todos esses assistentes tenho uma dívida de gratidão, por seu apoio inteligente e fiel.

A equipe da Harvard University Press mais uma vez fez todo o esforço para produzir um livro da mais alta qualidade, pelo que sou muito grato. Mais do que tudo, quero agradecer a Susan Wallace Boehmer, minha editora desde 1982, cujos bons conselhos ao longo do último ano aprimoraram significativamente a organização e a legibilidade deste livro.

Tenho esperanças sinceras de que *Isto é biologia* contribua com o melhor entendimento não só da biologia, mas também da ciência como um todo. Tal entendimento é necessário para que possamos desenvolver os valores pelos quais este país e o mundo inteiro terão de viver no futuro.

Cambridge, Massachusetts, setembro de 1996

Guia dos tópicos abordados

1. O que significa “vida”? , 19
 - Os fisicalistas, 21
 - O florescimento do fisicalismo, 24
 - Os vitalistas, 28
 - O declínio do vitalismo, 34
 - Os organicistas, 38
 - Emergência, 41
 - As características distintivas da vida, 43
2. O que é ciência?, 47
 - As origens da ciência moderna, 50
 - A biologia é uma ciência autônoma?, 54
 - Do que se ocupa a ciência, 58
 - Como a ciência difere da teologia, 58
 - Como a ciência difere da filosofia, 61
 - Como a ciência difere das humanidades, 63

- Os objetivos da pesquisa científica, 66
 - A ciência e o cientista, 69
- 3. Como a ciência explica o mundo natural?, 73
 - Uma breve história da filosofia da ciência, 76
 - Verificação e falseamento, 78
 - Novos modelos de explicação científica, 79
 - Descoberta e justificativa, 81
 - Fatores internos e externos da formação de teorias, 82
 - Teste, 83
 - O biólogo praticante, 85
 - Cinco estágios da explicação, 87
 - O realismo do senso comum, 87
 - A linguagem da ciência, 88
 - Definindo fatos, teorias, leis e conceitos, 92
 - Fatos *versus* teorias, 93
 - Leis universais nas ciências físicas, 94
 - Conceitos nas ciências da vida, 95
- 4. Como a biologia explica o mundo vivo?, 97
 - A causação na biologia, 99
 - Causas próximas e últimas, 100
 - Pluralismo, 101
 - Probabilismo, 103
 - Estudos de caso na explicação biológica, 104
 - Epistemologia evolutiva cognitiva, 107
 - Programas abertos e fechados, 110
 - A busca da certeza, 113

5. A ciência avança?, 116
 - O avanço científico na biologia celular, 121
 - Entendendo o núcleo, 125
 - Entendendo os cromossomos, 129
 - A ciência avança por meio de revoluções?, 131
 - O progresso na sistemática, 132
 - O progresso na biologia evolutiva, 134
 - O gradualismo nos avanços em biologia, 138
 - A ciência avança por um processo darwinista?, 141
 - Por que é tão difícil atingir o consenso científico, 144
 - Os limites da ciência, 148
6. Como se estruturam as ciências da vida?, 151
 - Os métodos comparativo e experimental na biologia, 154
 - Novas tentativas de estruturar a biologia, 157
 - Perguntas do tipo “O quê?”, 158
 - Perguntas do tipo “Como?” e “Por quê?”, 161
 - Uma nova classificação baseada em “Como?” e “Por quê?”, 166
 - Trocas de poder na biologia, 167
 - Biologia, uma ciência diversificada, 170
7. Perguntas do tipo “O quê?”: o estudo da biodiversidade, 173
 - A classificação na biologia, 175
 - Microtaxonomia: a demarcação das espécies, 177
 - Os conceitos concorrentes de espécie, 182
 - Conceito de espécie, categoria espécie e táxons de espécie, 184
 - Macrotaxonomia: a classificação das espécies, 186
 - Classificação de cima para baixo, 186
 - Classificação de baixo para cima, 188
 - Classificação evolutiva ou darwinista, 189

- Fenética numérica, 196
 - Cladificação, 197
 - Armazenando e recuperando informação, 201
 - Nomes, 202
 - O sistema dos organismos, 204
8. Perguntas do tipo “Como?”:
 - a construção de um novo indivíduo, 207
 - A alvorada da biologia do desenvolvimento, 209
 - O impacto da teoria celular, 212
 - Epigênese ou pré-formação?, 213
 - A diferenciação das células em desenvolvimento, 216
 - Formação dos folhetos germinativos, 220
 - Indução, 222
 - Recapitulação, 224
 - Genética do desenvolvimento, 226
 - O impacto da biologia molecular, 228
 - Desenvolvimento e biologia evolutiva, 231
 - A recapitulação reconsiderada, 233
 - Como ocorrem os avanços evolutivos, 234
 9. Perguntas do tipo “Por quê?”: a evolução dos organismos, 238
 - Os múltiplos significados de “evolução”, 239
 - A teoria de Darwin da evolução em si, 242
 - A origem da vida, 242
 - A teoria da origem comum de Darwin, 244
 - A origem dos seres humanos, 246
 - A teoria da multiplicação das espécies de Darwin, 247
 - A teoria do gradualismo de Darwin, 249
 - Extinções em massa, 251

A teoria da seleção natural de Darwin, 252
 Teorias concorrentes sobre a mudança evolutiva, 253
 Seleção natural, 254
 Acaso ou necessidade?, 256
 Seleção sexual, 259
 A síntese evolucionista e além, 260
 Explicando a macroevolução, 262
 Existe progresso evolutivo?, 265
 Por que os organismos não são perfeitos, 267
 Controvérsias atuais, 269
 Seleção de grupo, 271
 Sociobiologia, 273
 Biologia molecular, 275
 Múltiplas causas, múltiplas soluções, 276

10. Que perguntas faz a ecologia?, 278
 Uma breve história da ecologia, 279
 Ecologia hoje, 281
 A ecologia do indivíduo, 282
 A ecologia da espécie, 282
 Nicho, 283
 Competição, 285
 Estratégias reprodutivas e densidade populacional, 287
 Predadores, presas e coevolução, 289
 A cadeia alimentar e a pirâmide numérica, 290
 Histórias de vida e pesquisa taxonômica, 291
 A ecologia das comunidades, 293
 Sucessão e clímax, 294
 Ecossistema, 296
 Diversidade, 298

Paleoecologia, 299
 Controvérsias em ecologia, 300

11. Qual é o lugar do homem na evolução?, 303
 O parentesco entre os humanos e os grandes macacos, 305
 A ascensão do *Homo habilis*, do *Homo erectus* e do *Homo sapiens*, 308
 Os neandertais e o Homem de Cro-Magnon, 310
 Classificando táxons fósseis de homínídeos, 312
 Como o homem se tornou humano, 315
 Coevolução de linguagem, cérebro e mente, 318
 Evolução cultural, 322
 O nascimento da civilização, 325
 Raças humanas e o futuro da espécie humana, 326
 O sentido da igualdade humana, 329

12. Pode a evolução explicar a ética?, 331
 A origem da ética humana, 333
 Altruísmo de aptidão inclusiva, 335
 Altruísmo recíproco, 337
 A emergência do altruísmo genuíno, 339
 Como um grupo cultural adquire suas normas éticas próprias?, 342
 Razão ou sobrevivência aleatória?, 346
 Como um indivíduo adquire moralidade?, 347
 Um programa aberto de comportamento, 349
 Qual é o melhor sistema moral para a humanidade?, 352

Índice remissivo

aborto, 345, 353, 355
 Academia Nacional, 157, 168, 169
 acaso, 49, 103, 164, 255, 269
 Adanson, Michael, 133, 188, 373
 adaptação, 29, 33, 36, 70, 88, 140, 194, 240, 256, 260, 261, 269, 280, 370, 378
 Agassiz, Louis, 83, 104, 106
 agressividade, 344, 348
 alma, 19, 20, 22, 43, 360, 361
 altruísmo, 49, 95, 274, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 343, 380; de aptidão inclusiva, 335; genuíno, 339; recíproco, 337
 Alvarez, Walter, 98, 251
 Andrewartha, H. G., 288
 angiospermas, 300
 animais sociais, 323, 327, 337, 339, 343, 345, 380
 anti-selecionismo, 36
 apomorfias, 197

aprendizado, 33, 111, 347, 349, 350
 aptidão inclusiva, 335, 336, 337, 339, 340, 341, 348
 Archaeobacteria, 205, 206, 246, 375
Archaeopteryx, 105, 246
Ardipithecus ramidus, 307
 Aristóteles, 50, 117, 152, 174, 187, 210, 211, 246, 279, 331, 342, 360, 375; *eidos*, 211
 árvore filogenética, 85, 190, 197, 202, 244, 246, 247, 374
 Ashlock, Peter, 159, 198, 367, 372, 374, 375
 asteróide Alvarez, 300
Australopithecus, 306, 312, 313, 314
 autapomorfias, 197
 autoconsciência, 279
 Avery, Oswald, 226
 Ayala, Francisco, 310, 342
 babuínos, 322, 340
 Bacon, sir Francis, 76, 77

bactérias, 151, 160, 173, 204, 205, 245, 257, 375
 Baer, Karl Ernest von, 136, 153, 212, 220, 224, 225; lei de Von Baer, 225, 226
 Baker, John, 162, 163, 371
 Bates, H. W., 257
 Bateson, Pat, 119, 253, 260, 337, 373
 Beatty, John, 80, 86, 94
 behavioristas, 347
 Berg, I., 253
 Bernard, Claude, 24, 31, 153, 154
 Bichat, F. X., 31, 153
 biodiversidade, 168, 173, 174, 260, 373
 biogeografia, 85, 98, 117, 139, 153, 159, 174, 176, 245, 298, 372
 biogeógrafos, 102
 biologia, 152, 153, 379; autonomia da, 54, 55, 56, 58; ciência diversificada, 170; subdivisões clássicas da, 169; tentativas de estruturar, 157
 biologia celular, 121, 155, 157, 158, 159, 167
 biologia de populações, 169, 281, 282, 283, 291, 377, 379
 biologia evolutiva, 231; progressos na, 134
 biologia humana, 65, 304
 biologia molecular, 52, 118, 131, 137, 138, 149, 155, 157, 158, 165, 166, 167, 171, 174, 216, 218, 226, 228, 254, 275, 326
 biólogo, 85, 86; evolutivo, 159
 bioma, 296, 297
 bipedalismo, 303, 315, 316, 317
 Birch, Charles, 288
 blástula, 220, 221
 Blumenbach, J. F., 30, 31, 32, 36, 126, 135, 153, 238, 326

Bock, Walter, 159, 369, 372, 374, 375
 Bohr, Niels, 37, 39, 362
 botânica, 24, 54, 152, 155, 160, 168, 169, 186, 203, 284, 372, 373, 379
 Boveri, Theodor, 127, 129, 130, 131, 371
 brotamento, 195, 207, 313
 Brown, Robert, 122, 156, 373
 Brücke, Ernst, 24
 Buffon, 134, 136, 153, 181, 238, 279, 293
 Bush, Vannevar, 150
 caça, 317, 318, 340
Cactoblastis, 290
 cadeia alimentar, 290, 291
Caenorhabditis, 219
 Cambriano, 232, 264
 camelos, 104
 caracteres poligênicos, 265
 carnívoros, 290, 291
 Carr, E. M., 64
 Carson, Rachel, 356
 casamento, 323
 catastrofismo, 251
 categoria, 193
 causação, 99, 100, 104, 106, 165, 301, 370; próxima (funcional), 100, 162; sobrenatural, 58; última (evolutiva), 100, 162
 causas próximas, 100, 147, 155, 161, 162, 164, 165, 166, 167, 170, 301
 causas últimas, 164, 165, 166, 170, 237, 301
 Cavalier-Smith, T., 205, 375
 celenterados, 221, 230, 376
 células, 123, 124
 cérebro, 107, 109, 110, 111, 112, 121, 148, 208, 265, 306, 308, 309, 310, 311, 315, 316, 318, 320, 322, 340, 349, 350, 370

certeza, 63, 113
 chimpanzés, 110, 193, 303, 304, 305, 307, 308, 314, 315, 317, 318, 319, 320, 322, 323, 325, 332, 380
 ciência, 47-73; abertura da, 59; avanço da, 116, 117, 141; definição de, 48; descritiva, 52; e filosofia, 61; e teologia, 58; filosofia da, 54, 96; futuro da, 150; limites da, 148; objetivos da, 66; origem da moderna, 49, 50, 51, 53, 54; progresso na, 120; provinciana, 56, 57; sociologia da, 71; traços comuns, 58; unidade da, 57
 ciência isenta de valores, 67
 cientistas, 69, 70, 71
 círculo crescente, 354
 citologia, 24, 121, 122, 151, 154, 156, 157, 160, 168, 186, 370, 373; história da, 131
 citoplasma, 26, 34, 35, 122, 124, 131, 219
 civilização, 325
 cladificação, 134, 196, 198, 199, 201; deficiências da, 199
 cládon, 198, 199, 201
 classificação, 155, 174, 186, 188, 189, 190, 191, 193, 194, 195, 204; darwinista, 189, 192; de baixo para cima, 132, 188; de cima para baixo, 132, 186; de propósito especial, 188; evolutiva, 134, 189; funções da, 175; humana, 193
 Clements, Frederic, 294, 295
 clima, 294, 295, 297, 379
 código genético, 93, 245, 276
 coesão do genótipo, 121, 265
 coevolução, 280, 289, 290, 320, 340, 378
 comparação, 176
 competição, 49, 75, 88, 95, 103, 114, 117, 142, 240, 241, 257, 266, 275, 280, 284, 285, 286, 287, 288, 300, 323
 compreensão, 49
 Comte, Augusto, 334, 362
 conceito de espécie: biológico, 179, 180; de reconhecimento, 182, 184; dificuldades do, 180; evolutivo, 182; filogenético, 182, 184; nominalista, 182; tipológico, 178
 conceitos concorrentes de espécie, 182
 conceitos novos, 35, 49, 82, 95, 96, 140
 concepção semântica da estrutura teórica, 80
 conjectura, 74, 81, 87, 92, 105
 consciência, 57, 71, 105, 227, 240, 251, 312, 321, 331, 342, 350, 351, 359, 360
 Conselho de Biologia, 157
 consenso científico, 144
 conservação, 301, 357
 controvérsias, 92, 98, 101, 103, 117, 118, 122, 130, 137, 164, 165, 208, 269, 276, 281, 288, 300, 301, 356, 368
 convergência, 191
 Coon, Carleton, 309
 corrida armamentista, 289
 Crick, Francis, 37
 cristalino, formação do, 222, 223
 Cro-Magnon, 310, 311, 323
 cromossomos, 26, 70, 88, 127, 128, 129, 130, 147, 205, 213, 216, 217, 229, 230, 255, 265, 269, 380
 cuidado parental, 266, 314, 335, 336, 342
 Cuvier, Georges, 83, 153, 154, 244, 251, 267

Daphnia, 250
 Dart, R. A., 306
 Darwin, Charles: antiteleologista, 33; e acaso, 65; e aptidão inclusiva, 336; e conceito biológico de espécie, 180; e continuidade, 105; e especiação, 247, 248; e ética humana, 331; e herança de caracteres, 348; e método comparativo, 154; e origem comum, 244; e perguntas do tipo "Por quê?", 162; e pluralismo, 101; e seleção natural, 65, 252, 254, 255, 257, 258; e seleção por grupo, 342; e teoria da evolução, 20, 242; e variação, 90, 239; filósofo, 75; impacto na ecologia, 280; inconsistência de, 69; não-baconiano, 76
 darwinismo, 34, 36, 42, 68, 76, 85, 90, 106, 141, 231, 363
 darwinista, classificação, 190, 192, 194, 195, 197, 198, 201; epistemologia, 141; revolução, 135, 136, 331
 De Graaf, Regnier, 211
 De la Mettrie, 23
 definições, 90
 Descartes, René, 19, 22, 28, 50, 51, 63, 75, 76, 246, 360
 descobertas, 81, 138; moleculares, 275
 descontinuidade, 102, 105, 178, 194, 247
 descrição, 158
 desenvolvimento: biologia do, 31, 157, 158, 166, 170, 209, 211, 231, 234, 236, 239; determinado, 218, 222, 224, 229, 230; regulador, 218, 219, 222, 223, 229, 230
 desmatamento, 302
 determinação, 51, 166, 216
 DeVries, Hugo, 89, 119, 168, 253, 260, 262, 373
 diferenciação, 27, 215, 216, 217, 218, 219
Ding an sich, 109
 dinossauros, 72, 84, 85, 98, 99, 191, 192, 194, 199, 251, 252, 268, 291, 300
 diploidia, 136, 213
 disciplinas biológicas, 154, 155, 156, 158, 159, 161, 165, 169, 170, 171, 176, 278, 301, 378
 divergência filogenética, 190
 divergência, princípio da, 119, 286
 diversidade da vida, 102, 159, 173
 divisão lógica, 132, 187
 divisão reductiva, 127
 dna, 42, 93, 128, 149, 193, 213, 226, 228, 229, 254, 268, 275, 309, 380; diferentes tipos de, 227; hibridização de, 196, 380; não-codificante, 149; portador da informação genética, 226; programa do, 216
 Dobzhansky, Theodosius, 241, 242, 260, 261, 377
 doenças humanas, 189
 domínios da ciência, 61
 Driesch, Hans, 27, 32, 33, 61, 156, 218, 361, 362
Drosophila, 120, 193, 195, 229, 230, 236; estrutura metamérica, 229
 dualismo, 43
 DuBois-Reymond, Emil, 24, 25, 148, 153, 167, 361, 371
 Dupré, J., 198
 ecologia, 278-302; controvérsias na, 300, 301, 302; da espécie, 282, 283; de comunidades, 293; de plantas, 281, 296; do indivíduo, 282; história da, 279, 280
 ecossistema, 117, 148, 185, 281, 296, 297, 325, 379

Ehrlich, Paul, 356
 Einstein, Albert, 114, 118
 Eldredge, Niles, 105, 146, 235, 263, 264, 371
 elo perdido, 105, 306
 Elton, Charles, 283, 284, 289, 290
emboitement, 214
 embriologia, 25, 27, 153, 154, 155, 157, 161, 169, 208, 210, 212, 222, 225, 230, 245, 373, 379
 emergência, 41, 42, 257, 263, 321, 339, 362
 empirismo lógico, 78, 86
 energia, 22, 25, 26, 45, 46, 170, 275, 297, 359
 enigmas, sem solução, 115
Entelechie, 30, 32
Entwicklungsmechaniker, 164
 epigênese, 31, 103, 125, 126, 131, 210, 215, 216
 epistemologia, 76, 107, 109, 112, 113, 131, 141, 142, 143
 epistemologia evolutiva: cognitiva, 107; darwinista, 107, 131, 141, 143
 equilíbrio pontuado, 102, 105, 263, 264
 equívocos, 90, 91, 367
 erros, 70, 113, 210, 216, 254
 escolha da fêmea, 95, 259
 especiação, 140, 241, 247, 248; dicopátrica, 247; geográfica (alopátrica), 145, 247, 248; parapatrica, 249; simpátrica, 145
 espécie(s), 177, 178, 179, 180, 181, 182, 184, 185; categoria, 184; classificação das, 186; monotípicas, 181; multiplicação das, 183, 247; na ecologia, 185; na evolução, 185; número de, 292; polítípicas, 181; problema das, 177; seleção, 272, 286; substituição, 272, 286; táxons de, 184
 espécies-gêmeas, 179
 espécie-tronco, 195, 197, 198, 199, 200, 201, 374
 essencialismo, 91, 136, 146, 283, 305, 360, 369
 estabilidade dos sistemas de comunicação, 201
 estampagem, 349
 estase, 194, 235, 263, 264, 265, 277, 321
 estocásticos, processos, 51, 104, 137, 191, 240, 370
 estradas paralelas, 106
 estratégia de seleção K, 287
 estratégia reprodutiva, 287
 estruturalistas, 164
 estruturas vestigiais, 232
 ética: ambiental, 356; de grupo, 341; e aquisição de normas, 342, 343, 345, 346; e comportamento, 341; e educação, 350; e razão, 346; humana, 332, 333, 336, 339, 341, 347, 353; individual vs. social, 356; naturalista, 332
 Eubacteria, 205
 eucariontes, 160, 204, 205, 206, 265
 eugenia, 328
 Evans, F. C., 297
 Evolução: cultural, 321, 322, 333; emergente, 41; em mosaico, 308, 313; especiativa, 105, 263, 264; filética, 183, 240, 241; neutra, 270, 271; quântica, 262; significados da, 239; transformacional, 239, 240, 261, 263, 267; transmutacional, 239; um fato, 242; variacional, 240, 241
 exclusão competitiva, 286, 300
 experimento, 52, 84; natural, 53

explicação biológica, 102, 104
 extinção, 84, 251, 267, 299; universalidade da, 267
 extinções em massa, 251, 252, 267
 falseamento, 60, 75, 78, 79, 94, 98, 102, 114
 família, 104, 193, 203, 323, 324, 335, 339, 340, 342, 344, 353
 fato, 93
 fator limitante, 284
 fatores externos, 82, 83
 fatores internos, 82
 fatores socioeconômicos na ciência, 83
 fenética numérica, 133, 196, 198; insuficiências da, 196
 fenótipo, 44, 46, 114, 166, 192, 193, 215, 216, 230, 232, 234, 235, 236, 254, 255, 257, 265, 268, 271, 273, 275, 282, 329, 378
 fertilização, 26, 125, 126, 127, 129, 156, 207, 208, 213, 214
 Feyerabend, Paul, 68, 86, 141, 366
 filosofia: diferenças entre ciência e, 61, 63; filosofia da ciência, 62, 63, 76, 77
 finalismo, 33
 fiscalismo, 21, 23, 24, 28, 29, 32, 34, 36, 37, 39, 103, 136, 161, 280
 fiscalistas, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 36, 39, 103, 125, 127, 141, 146, 162, 213, 294, 361, 364
 fisiologia, 24, 54, 95, 118, 119, 131, 152, 153, 154, 155, 157, 158, 161, 163, 166, 169, 171, 176, 304, 359, 372, 373, 378, 379
 flutuações de população, 289
 folhetos germinativos, 220, 221, 222, 234, 374; especificidade dos, 221
 força vital, 24, 25, 30, 32, 34, 35, 36
 fósseis vivos, 114
 fotossintéticas, plantas, 290, 291
 fraudes, 69
 função, mudança de, 232, 248, 250
 Galeno, 152
 Galileu, 23, 29, 50, 53, 118, 360
 Galton, Francis, 328
 gastrulação, 234
 Gause, G. F., 286
 genealogia, 189, 190, 195, 197
 genes: aditivos, 265; natureza dos, 228
 genes *Hox*, 230
 genética, 35, 119, 166, 171, 215, 225; do desenvolvimento, 225; fisiológica, 226; transmissão, 226
 genótipo, 44, 45, 46, 101, 166, 215, 218, 219, 228, 232, 234, 235, 254, 264, 268, 270, 271, 282, 327, 328, 336, 378
 geologia, história da, 117
 geração espontânea, 30, 124, 125, 240, 241, 242
 Ghiselin, Michael, 159, 361, 365, 367, 368, 369, 372
 Giere, R., 75, 363
 Gleason, Herbert, 296, 297
 Goethe, Johann Wolfgang von, 153
 Goldschmidt, Richard, 128, 226, 253, 262
 Gould, Stephen J., 105, 146, 235, 263, 264, 371
 gradualismo, 138, 140, 146, 241, 249, 251, 261, 332, 367
 Grinnell, Joseph, 284
 grupos culturais humanos, 339, 343, 345
 grupos irmãos, 199, 200, 201
 guildas, 298

Haeckel, Ernst, 33, 225, 233, 234, 246,
 247, 278, 279, 304, 372, 374, 376
 Haldane, J. B. S., 38, 40, 235, 329, 336,
 361, 362, 380
 Hardin, Garrett, 356
 Harper, J. L., 281
 Harvey, William, 211
 Heisenberg, Werner, 37, 362
 Helmholtz, Hermann, 24, 153
 Hempel, Carl, 79, 363, 364, 367, 368,
 374
 Hennig, Willi, 134, 159, 196, 197, 198,
 200, 201, 367, 372
 herança dos caracteres adquiridos,
 136, 254, 260
 herbívoros, 189, 285, 289, 290, 291, 379
 Herschel, William, 61, 75, 103, 162
 Hertwig, Oskar, 126, 128, 130, 131, 213
 heterocronia, 236
 híbridos, 90, 179, 214
 hierarquia, 188; lineana, 136, 184, 193,
 194, 195, 244, 367
 hipótese, 81, 92
 hipótese da Eva, 310
 história natural, 25, 54, 152, 153, 162,
 279, 280, 292, 293, 373, 377, 378,
 379
 holismo, 39, 40, 41, 363
 holofilético, 198, 367
 Holton, Gerald, 95
 homem *ver* humanos
 homeoboxes, 171
Homo erectus, 306, 308, 309, 310, 312,
 314, 317, 318, 322, 327
Homo habilis, 308, 309, 312, 322
Homo rudolfensis, 308
Homo sapiens, 97, 304, 305, 306, 308,
 309, 310, 312, 314, 322, 327
Homo sapiens sapiens, 309, 310, 311,
 312, 322
 homologia, 190, 191, 368, 374
 homoplasia, 191
 Hooke, Robert, 121
 humanidades, diferentes da ciência,
 63, 64
 humanismo evolutivo, 358
 humanização, 315, 318, 341
 humanos, origem dos, 246; evolução
 dos, 303, 304; parentesco com os
 grandes macacos, 304, 305, 307;
 tornando-se, 315
 Humboldt, Alexander von, 280, 293,
 294
 Hume, David, 75, 78, 98, 370
 Hutchinson, Evelyn, 284
 Huxley, Julian, 314, 358
 Huxley, T. H., 47, 239, 253, 333, 362, 381
 identificação, 186
 igualdade humana, 329
 inconsistência, 69, 70
 indivíduo, 232, 346, 347
 indução, 48, 76, 77, 124, 131, 219, 222,
 223, 230
 inferência, 70, 98, 101, 130, 155, 157,
 166, 257
 informação, armazenar e recuperar,
 201
 instrumentação, 52, 109
 instrumentos, 24
 íntegron, 42, 43, 362, 363
 intensificação de função, 250
 irritabilidade, 31
 Jacob, François, 36, 41, 86, 361, 362
 Jennings, H. S., 107
 justificativa, lógica da, 62
 Kant, Immanuel, 28, 33, 36, 61, 74, 75,
 109, 112, 124, 238, 246, 331, 342

Kepler, Johannes, 23, 50, 52, 113, 117
 Kimura, M., 271
 Kitcher, Philip, 117, 365, 366
 Koelreuter, J. G., 126, 213, 214
 Kölliker, R. A., 26, 35, 125, 213, 253, 362
 Krakatoa, 53, 295
 Kuhn, Thomas S., 86, 131, 132, 134,
 135, 138, 140, 141, 144, 366, 371
 Lack, David, 163, 288
 Lamarck, 70, 117, 135, 153, 238, 240,
 241, 303, 304
 Laudan, L., 86, 114, 363, 364, 365, 366,
 367
Lebenskraft, 30, 32, 361
 Leeuwenhoek, A., 121, 213
 lei biogenética, 225
 leis, 37, 51, 94, 153
 Lenda, a", 117
 Lenoir, Timothy, 29, 361, 362
 Leopold, Aldo, 302, 356
 Liebig, Justus von, 24, 77, 153
 limites à eficácia da seleção natural, 267
 limites da zona de distribuição de uma
 espécie, 284
 Lindeman, R., 297
 lineana, hierarquia, 367
 Lineu, C., 132, 135, 152, 168, 174, 178,
 185, 187, 188, 203, 279, 280, 303,
 373
 linguagem, 318, 321; evolução da, 319
 Loeb, Jacques, 24, 27, 29, 127
 lógica, 77
 Lorenz, Konrad, 109, 110, 112, 137,
 351, 370, 372
 Lotka, A. J., 283
 Ludwig, Carl S., 24, 26, 29
 Lyell, Charles, 70, 94, 106, 117, 238,
 249, 251

MacArthur, Robert, 299, 379
 macroevolução, 140, 174, 235, 249,
 261, 262, 263, 273
 macrotaxonomia, 133, 154, 177, 184,
 186, 198, 373
 Magendie, François, 153
 Maier, A., 22, 360
 Malpighi, 121, 211, 214
 mamíferos, 99; irradiação dos, 252
 Mangold, Hilde, 223
 máquina, 22, 23
 mariposa-da-iúca, 290
 Marsh, George Perkins, 302
 matemática, 23, 32, 50, 64, 76, 77, 85,
 97, 366
 May, Robert, 299
 Mayr, Ernst, 159, 261, 307
 mecânica, 25, 26, 27, 37, 50, 51, 52, 54,
 57, 76, 78, 118, 149
 mecanicistas, 21, 23, 26, 27, 31, 33, 39,
 40, 52, 81
 mecanismos de isolamento, 147, 181,
 247, 248, 276, 377
 mecanismos regulatórios, 44, 149
 Meckel-Serrès, lei de, 224, 233
 medicina, 54, 66, 67, 69, 118, 151, 152,
 156, 329
 meiose, 127, 129, 255, 269
 memória, 32, 112, 360
 Mendel, Gregor, 90, 128, 136, 140, 153,
 168, 260, 373
 mendelianos, 119, 253, 260
 mente humana, 321, 365
 Merriam, C. Gart, 280
 Merton, Robert, 71
 mesoderma, 220, 221, 222
 método: comparativo, 154; experi-
 mental, 155; hipotético-dedutivo,
 78
 Meyen, F. J. E., 122, 123, 139, 373

Michener, Charles D., 192
microscópios, 52, 122, 124, 211
microtaxonomia, 177
Miescher, Johann Friedrich, 26, 27,
126, 213
migrações sociais, 274
Milkman, Roger, 236
Miller, Stanley, 243
mimetismo, 257
mitose, 127, 128, 129, 130, 217
modelo, 92
modelo d-n, 79
modificação não-genética, 268
monofilético, 190, 194, 198, 367
monofilia, 190, 192, 194, 196, 199, 374
monogamia, 323
Montpellier, Escola de, 31
Moore, John A., 55, 376
moralidade humana, 332, 339
morfologia comparada, 166, 372
Morgan, Lloyd, 42, 80, 362
Morgan, T. H., 89, 147, 226, 261
mortalidade, 68, 283, 288, 320, 344
morte, 19, 20, 61, 288, 337, 345, 360,
361
movimento anticiência, 116
movimentos, 25, 26
Müller, Johannes, 24, 30, 32, 36, 153,
154, 167, 361, 372, 373
mundo, 107, 108, 109; desencanta-
mento do, 22; médio, 45, 108, 109;
transgaláctico, 108, 109
Munson, Ronald, 56
mutação, 89, 104, 136, 142, 184, 227,
232, 235, 239; aleatória, 104

Nagel, Ernst, 40, 362, 363, 364, 372
Nägeli, Karl Wilhelm von, 26, 361
narrativas históricas, 63, 77, 79, 93, 98,
99, 101, 166

Naturphilosophie, 32, 153
neandertal, 305, 310, 320; e *Homo
sapiens sapiens*, 311
necessidade, 256
neolamarckismo, 253
Newton, Isaac, 23, 29, 30, 50, 52, 114,
117
nicho, 88, 180, 185, 191, 280, 283, 284,
286, 292, 296, 316, 324, 329; vago,
284
nível, 193, 199
nomenclatura, 202, 203, 204, 314, 375
nomes de táxons, 202, 204
Novikoff, Alex, 40, 363
núcleo, 125, 126

observação, 52, 84
Odum, Eugene, 297
Odum, Howard, 297
olhos, origem dos, 250
Oppenheim, Paul, 79
organicismo, 21, 38, 39, 41, 42, 54, 103,
362
organicistas, 38, 39
organização, 39, 40, 41, 45
organizador, 223
Orians, G. H., 163, 378
origem comum, teoria da, 49, 84, 85,
93, 133, 135, 139, 140, 154, 189,
190, 191, 202, 225, 241, 244, 245,
246, 303, 331, 368
origem da vida, 44, 205, 242, 243, 377
ortogenéticas, teorias, 253
Osborn, H. F., 253
Ostwald, Wilhelm, 25
ovos de mamíferos, 210

paleoecologia, 299, 377
paleontólogos, 139, 144, 146, 182, 192,
241, 261, 262, 263, 264, 299, 374

Pander, Christian, 212, 220, 375
pangênese, 119, 210
paradigma, 132, 133
paradigmas profundos, 146
parafiletico, 194, 199
paralelismo, 191
parentesco, 205, 245, 274, 305, 337,
340
partenogênese, 127, 208
Pearl, Raymond, 283
penas, 94, 114, 187, 250
pensamento populacional, 70, 177,
236, 253, 261, 283, 301, 305, 314
percepções, 59, 107, 108, 360
perfeição, 267
perguntas, 81; levando a uma hipó-
tese, 81
perguntas do tipo "Como?", 161
perguntas do tipo "O quê?", 62, 149,
161, 373
perguntas do tipo "Por quê?", 101, 161,
162, 164, 377
pesquisa científica, 66, 67, 158
pica-paus, 284
Pithecanthropus erectus, 306
pleiotrópicos, processos, 236
pluralidade, 52, 102, 146, 354
pluralismo, 77, 87, 102, 277, 301
poliandria, 324
poliginia, 323
poliploidia, 249, 253, 276, 323
Popper, Karl, 68, 70, 75, 78, 82, 85, 86,
91, 140, 141, 363, 367, 368, 369
populações: geograficamente isola-
das, 180
populações fundadoras, 147, 235, 263,
313
Pré-Cambriano, 232, 264
predação, 279, 280, 286, 287, 288, 297,
300

pré-formação, 31, 123, 125; 131, 210,
213, 214, 216
prêmios Nobel, 50, 168
pressão dos predadores, 289
previsão, 49, 51, 83; cronológica, 83
prioridade, 69, 71, 204
probabilismo, 63, 77, 102
procariontes, 44, 155, 160, 168, 173,
204, 205, 207, 246, 265, 266, 276,
281, 293
produtores, 290
programas: abertos e fechados, 110;
adaptacionista, 117, 257; com-
portamental aberto, 350; gené-
tico, 38, 44; somático, 234
progresso: científico, 117, 118, 119,
121; na evolução, 265; na sistemá-
tica, 132
proteínas, 44, 93, 119, 128, 140, 143,
227, 228, 243, 254, 255, 276, 324,
376, 380
protistas, 110, 160, 205, 206, 207, 231,
245, 254, 265, 293
protoplasma, 29, 34, 35, 362
psicovitalismo, 30
Psychozoa, 314, 325

química, 24, 54, 55

raças humanas, 326
Ramapithecus, 305
ramificada, árvore filogenética, 244
Rathke, Heinrich, 212, 224
realismo: científico, 108; do senso
comum, 59, 87, 88, 109
recapitulação, 164, 224, 225, 233, 234,
246, 376
recombinação gênica, 136
recompensas por conquistas, 338
reducionismo, 34, 39, 40, 136

Regal, Philip, 300, 371
 registro fóssil, 105, 146, 195, 251, 261, 263, 264, 308, 310, 313, 316
 regularidade da natureza, 94
 religiões, 59, 73, 331, 346, 355
 Remak, Robert, 124, 125, 128, 139, 213, 373
 Rensch, Bernhard, 159, 261, 359, 377
 reprodução sexuada, 207, 208, 255, 272
 responsabilidade em relação à natureza, 356
 reversão, 49, 191
 revolução científica, 132, 133, 134, 135, 137, 144
 revoluções kuhnianas, 140, 143
 Ritter, W. E., 38, 39, 40
 Romanes, G. J., 162
 Rosen, Donn, 184, 374
 Roux, Wilhelm, 25, 27, 127, 128, 217, 218, 219, 222, 268, 361, 371
 Ruse, Michael, 273, 274, 275, 381
 Russell, Bertrand, 343
 Russell, E. S., 40, 361
 Rutherford, E., 162

Sachs, Julius, 24, 27, 29
 Salmon, W., 81, 366
 saltacionismo, 138, 142, 253, 261, 262
scala naturae, 136, 224, 244, 304
 Schelling, F. W. J., 32, 124
 Schleiden, Matthias, 24, 122, 123, 124, 137, 153, 156, 167, 212, 372, 373
 Schmalhausen, Ivan, 226, 376
 Schrödinger, Erwin, 37
 Schwann, Theodor, 119, 122, 123, 124, 137, 153, 156, 167, 212, 372, 373
 seleção: alvo de, 270, 271, 335, 339; de", 270; normalizadora, 264; para", 270; processo em duas etapas, 254; sexual, 101, 248, 250, 259, 274; unidade de, 269, 270
 seleção de grupo, 90, 271, 272, 288, 327, 339, 341
 seleção natural, 65, 103, 106, 146, 267, 288, 333; teoria de Darwin da, 252, 254, 255
 seleção por parentesco, 288, 336
 seleção r, 287
 selecionismo, 33, 138, 147, 362
 semelhança, 189, 190
 sensibilidade, 31, 329
 senso comum, 47, 48, 87, 88, 370
 senso moral: adquirido, 347, 348; inato, 347, 348; origem do, 342; resultante de razão ou sobrevivência, 346
 Severtsoff, A., 250
 simbiose, 205, 290
 Simpson, George Gaylord, 159, 174, 177, 182, 261, 262, 324, 341, 354, 372, 373, 374, 377
Sinanthropus pekinensis, 306
 sinecologia, 281, 293
 Singer, P., 354
 singularidade, 98, 173
 síntese evolucionista, 117, 136, 138, 168, 252, 253, 254, 260, 261, 262, 269
 sistema dos organismos, 204, 206
 sistema moral, 352
 sistemas: abertos, 45, 359; adaptados, 42, 45; altamente complexos, 149; ordenados, 38, 43, 45; teleonômicos, 45
 sistemática, 152; definição, 174
 Smart, J. J. C., 94
 Smuts, J. C., 39, 40, 362, 363
 Snow, C. P., 63, 64, 65, 364
 sobrenatural, 21, 22, 23, 30, 58, 73, 135, 242, 304, 332
 sociedades feudais, 345

sociobiologia, 68, 273, 274, 275
 Spemann, Hans, 167, 222, 223
 Spencer, Herbert, 162, 266
 Stahl, Georg Ernst, 31
 Stebbins, G. Ledyard, 261
 Stensen, Niels, 211
 Strasburger, Edward, 26, 371
 sucessão, 294
 sucesso reprodutivo, 147, 259, 271, 274, 292, 320, 321, 322, 334, 368
 superorganismo, 295, 296
 superpopulação, 65, 356, 357

tafonomia, 299
 tamanho de grupo, em humanos, 322
 tamanho dos organismos vivos, 45
 Tansley, A. G., 296
 taxa de mudança evolutiva, 235
 taxonomia, 174, 175, 176; pesquisa em, 291, 292
 táxons, 195, 198, 199, 200, 202
 táxons fósseis, classificação dos, 195; de homínídeos, 311
 tectônica de placas, 117, 139
 Teilhard de Chardin, Pierre, 253
 teleologia, 33, 36, 136, 140, 146, 281, 360
 teleomecanistas, 29
 Teofrasto, 174, 189
 teologia: diferindo da ciência, 58, 59, 60; natural, 49, 54, 146, 161, 162, 279, 280, 332
 teoria celular, 125, 137, 153, 156, 167, 208, 212, 220
 teoria sintética, 137, 142
 teorias, 75, 91, 92, 118; avanços em, 119; formação de, 82, 216; não-darwinistas, 253; refutadas, 118
 termos, mudança no significado de, 88, 89

teste, 59, 83, 85
 themata, 95
 Thompson, P., 80, 142, 366
 Thoreau, Henry David, 295
 Timofeef-Ressovsky, Nikolai, 261
 tipo, em nomenclatura, 203
 topobiologia, 224
 tordos, 244
 tradição antropocêntrica, 247
 transmissão cultural, 142, 318
 transmutacionismo, 239
 transplante, experiências com, 221, 223
 Trevino, S., 317
 Treviranus, G. R., 153
 Trivers, Robert, 334, 377
 trocas de poder: na biologia, 167

Uexküll, Jacob J. von, 107, 361
 unidade de seleção, 269, 270
 uniformitarismo, 70, 94, 249
 uniparentais, organismos, 180
 uso de ferramentas, 315, 316

valores, 67, 68
 variação, 142; fonte de, 142; genética, 42, 136, 142, 235, 236, 240, 254, 267, 269, 271, 275, 283, 327, 363; geográfica, 178, 236, 257, 309, 314; morfológica, 178; produção de, 254
 variedade, 88, 90, 178
 vegetação, tipos de, 293, 294, 296
 verdade, 58, 59, 60, 76
 verificação, 78, 84, 102, 365
 vicariância, 102, 103
 vida, 19-46; características da, 43, 45, 46; ciclo da, 45; história de, 291; origem da, 242
vis essentialis, 31, 215, 216, 376
 visão animista, 19, 22, 31

ESTA OBRA FOI COMPOSTA EM MINION POR OSMANE GARCIA FILHO E
IMPRESSA PELA GRÁFICA BARTIRA EM OFSETE SOBRE PAPEL PÓLEN SOFT DA
SUZANO PAPEL E CELULOSE PARA A EDITORA SCHWARCZ EM MARÇO DE 2008

valores éticos atuais, calcados sobre os direitos do indivíduo, se tornaram obsoletos hoje, por serem incapazes de estimular a solidariedade e o cuidado com o planeta, essenciais para a sobrevivência da espécie. A saída para esse impasse, propõe, é adotar uma nova ética, baseada no que ele chama de humanismo evolutivo. Somente ao reconhecermos o homem e sua sociedade como produtos da evolução, ensina, poderemos superar as limitações impostas pelo nosso passado ao nosso futuro comum.

Claudio Angelo



Ernst Mayr nasceu em Kempten, na Alemanha, em 1904. Em 1931 mudou-se para os Estados Unidos, onde trabalhou no Museu Americano de História Natural e depois na Universidade Harvard. Taxonomista e ornitólogo, é autor de clássicos da biologia como Sistemática e origem das espécies (1942) e O desenvolvimento do pensamento biológico (1982). Dele, a Companhia das Letras publicou Biologia, ciência única. Morreu em Bedford, Massachusetts, em fevereiro de 2005.