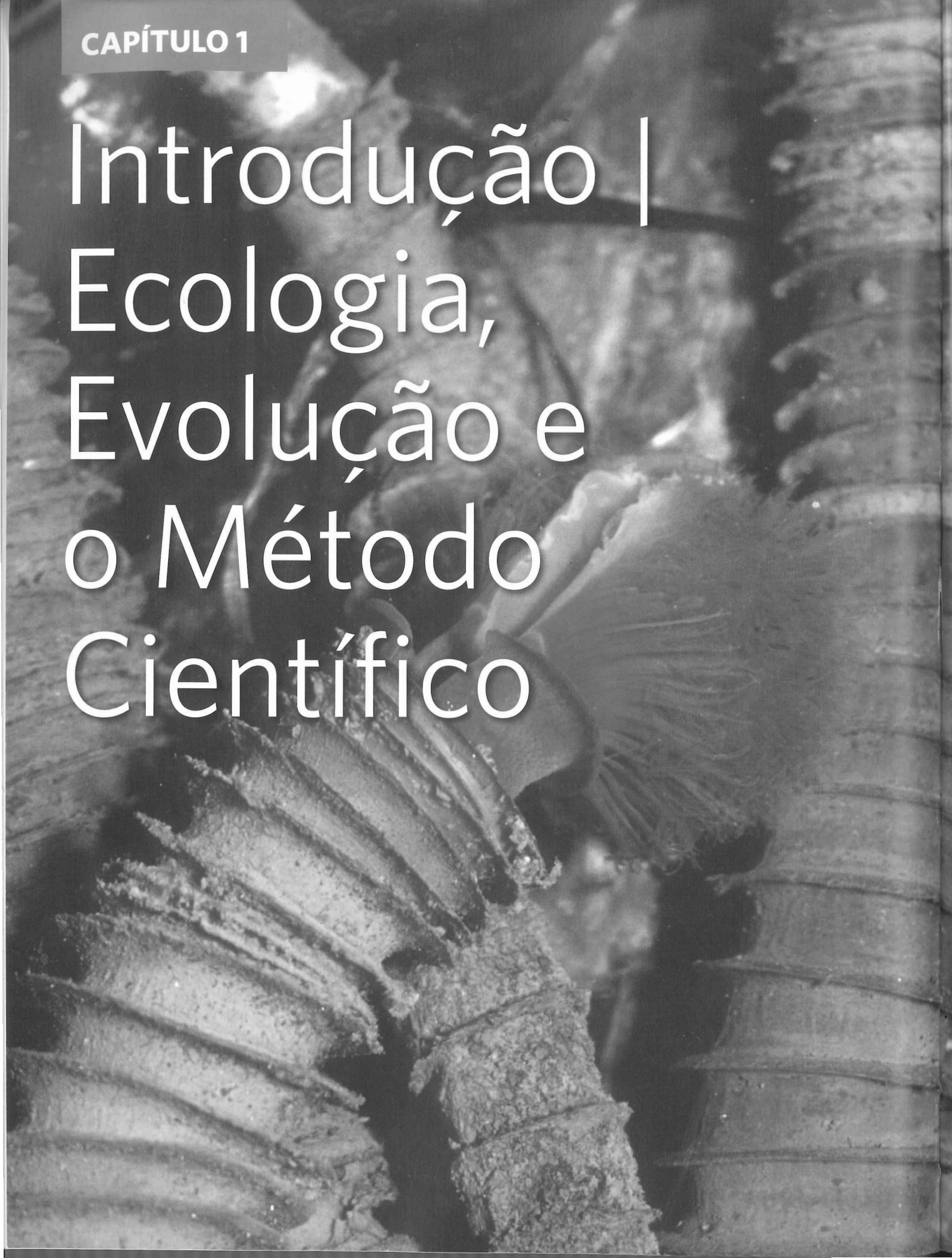


# Introdução | Ecologia, Evolução e o Método Científico





# A Procura pela Vida no Fundo do Oceano

No início do século 19, os cientistas criaram a hipótese de que as águas profundas dos oceanos eram desprovidas de vida. Embora, naquela época, não fosse possível explorar as regiões mais profundas do oceano, eles sabiam que a luz solar não poderia penetrar em profundidades superiores a 275 m. Sem luz solar não pode haver fotossíntese; sem fotossíntese, não pode haver plantas ou algas, que servem de alimento para outros organismos. Pensava-se que as baixas temperaturas e pressões extremas das águas do oceano profundo contribuiriam para a ausência de vida no fundo do mar. Considerando que as profundezas do oceano podem exceder 10.000 m, era razoável a hipótese de que as áreas mais profundas do oceano não poderiam sustentar a vida.

Como a exploração continuou ao longo do século 19, os cientistas começaram a coletar organismos de profundidades cada vez maiores do oceano, e as suas ideias sobre os limites da vida começaram a mudar. Em uma expedição em 1873, os cientistas a bordo do navio de pesquisa britânico HMS *Challenger* arrastaram uma grande e pesada caixa, aberta em um dos lados, suspensa por cordas compridas atrás do navio, pelo fundo do oceano Atlântico. Tal caixa, conhecida como draga, obteve amostras do fundo do mar em diferentes partes do oceano em pro-

“Como tanta vida poderia existir no fundo do oceano?”

fundidades de até 4.572 m. Os cientistas ficaram surpresos ao descobrir cerca de 5.000 espécies previamente desconhecidas; quando se tornou claro

que a vida florescia em profundidades além da penetração da luz, eles foram forçados a rejeitar a sua hipótese anterior.

Depois de descobrir esta rica abundância de vida em alto-mar, os cientistas foram confrontados com a necessidade de entender como ela poderia existir. A falta de luz sugeriu que os organismos do fundo do mar estavam lá, de alguma maneira, sendo sustentados por uma energia não originada pela fotossíntese. Observaram que as águas superficiais do oceano produzem uma queda constante de pequenas partículas originárias da morte e decomposição dos organismos que vivem nessas águas. Essas partículas são chamadas “neve marinha”. Além desta, organismos grandes (p. ex., baleias) ocasionalmente morrem e caem no assoalho oceânico. Os cientistas criaram a hipótese de que neve marinha e esses restos de organismos grandes proporcionam a energia necessária para sustentar os organismos das profundezas.

Na década de 1970, os cientistas finalmente conseguiram enviar submersíveis – pequenos submarinos tripulados – para ter uma primeira visão das áreas mais profundas do oceano. Suas descobertas foram chocantes. Eles não só confirmaram que uma grande parte do fundo do oceano su-

**Uma chaminé no fundo do mar.** Em algumas regiões do fundo do oceano, água quente contendo compostos de enxofre é liberada do fundo. Os compostos de enxofre fornecem energia para as bactérias quimiossintéticas, que depois servem de alimento para muitas outras espécies que vivem no entorno das chaminés, incluindo esses vermes tubulares cor de ferrugem (*Tevnia jerichonana*), coloridos de laranja pelos compostos de ferro liberados das chaminés. (Fotografia de Peter Batson/Imagem Quest Marine.)

porta organismos vivos, mas também que áreas próximas a aberturas no fundo do oceano (mais tarde chamadas *chaminés hidrotérmicas*) continham uma grande diversidade de espécies do fundo do mar. As chaminés hidrotérmicas liberam plumas de água quente com altas concentrações de compostos de enxofre e outros nutrientes minerais. Uma enorme diversidade de espécies encontra-se no entorno destas chaminés hidrotérmicas, incluindo poliquetas, moluscos, caranguejos e peixes. De fato, a quantidade total de vida nessas profundezas se igualava àquelas vistas em alguns dos lugares de maior diversidade da Terra. Ficou claro que a quantidade de energia contida na matéria orgânica em queda – a neve marinha – não era suficiente para suportar um conjunto tão diverso e abundante de formas de vida. Aquela hipótese inicial agora deveria ser rejeitada.

Como tanta vida poderia existir no fundo do oceano? Como essa vida existia no entorno das chaminés hidrotérmicas, foi sugerido que as chaminés eram, de alguma maneira, responsáveis por isso. Os cientistas sabiam há muito tempo que algumas espécies de bactérias podem obter energia de produtos químicos em vez da energia solar. Para produzir compostos orgânicos, as bactérias usam a energia das ligações químicas combinada com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) — um processo conhecido como *quimiossíntese* —, de maneira similar às plantas e às algas que usam a energia do Sol e o  $\text{CO}_2$  para produzir compostos orgânicos por meio da fotossíntese. Com base nesse conhecimento, os cientistas formularam a hipótese de que as chaminés hidrotérmicas, que liberam água com o gás sulfeto de hidrogênio dissolvido e outros químicos, forneciam uma fonte de energia para as bactérias e que estas poderiam ser consumidas por outros organismos em torno das chaminés. Após vários anos de investigações, os cientistas descobriram que a área imediatamente ao redor das chaminés térmicas continha um grupo de organismos conhecidos como vermes tubulares (pogonóferos), que podem crescer mais de 2 m de comprimento. Esses animais não têm um sistema digestório, mas dispõem de órgãos especializados que abrigam um grande número de bactérias quimiossintéticas, as quais vivem em uma relação simbiótica com os vermes. Os vermes tubulares capturam os gases de sulfeto e o  $\text{CO}_2$  das águas circundantes e os passam para as bactérias, que então usam o sulfeto e o  $\text{CO}_2$  para produzir compostos orgânicos. Alguns desses compostos são passados para os vermes tubulares, que os utilizam como alimento. Essas bactérias também representam uma fonte de alimento para muitos dos outros animais que vivem próximo às chaminés. Por sua vez, esses animais que ingerem bactérias podem ser consumidos por animais maiores, como os peixes.

A história das chaminés do fundo do mar revela como os cientistas trabalham: eles fazem observações, elaboram hipóteses, testam cada uma delas para confirmar ou rejeitá-las e, se uma hipótese for rejeitada, concebem uma nova. Como será possível notar neste capítulo e nos subseqüentes, a ciência é um processo contínuo que, muitas vezes, leva a descobertas fascinantes sobre como a natureza funciona.

Fontes: Dubilier et al. Symbiotic diversity in marine animals: The art of harnessing chemosynthesis. *Nature Reviews Microbiology* 6 (2008): 725-740.  
Dunn RR. *Every Living Thing* (Harper Collins, 2002).

## CONCEITOS DO CAPÍTULO

- Os sistemas ecológicos existem em uma organização hierárquica.
- Os sistemas ecológicos são governados por princípios físicos e biológicos.
- Diferentes organismos desempenham diversos papéis nos sistemas ecológicos.
- Os cientistas usam várias abordagens para estudar a ecologia.
- Os humanos influenciam os sistemas ecológicos.

► A história das chaminés hidrotérmicas oferece uma excelente introdução à ciência da *ecologia*. A **ecologia** é o estudo científico da abundância e distribuição dos organismos em relação a outros organismos e às condições ambientais. A palavra *ecologia* é oriunda do grego *oikos*, que significa “casa” e, portanto, refere-se ao nosso entorno imediato, ou ambiente.

Embora Charles Darwin nunca tenha usado a palavra *ecologia* em seus escritos, ele avaliou a importância das interações benéficas e prejudiciais entre as espécies. Em seu livro, *A origem das espécies*, publicado em 1859, Darwin comparou o grande número de interações entre as espécies na natureza com o grande número de interações entre os consumidores e os fornecedores no sistema econômico humano. Ele descreveu as interações entre as espécies como “a economia da natureza”.

Em 1870, o zoólogo alemão Ernst Haeckel deu à palavra um sentido mais amplo:

Por *ecologia*, nós queremos dizer o corpo de conhecimento referente à economia da natureza – a investigação das relações totais dos animais tanto com o seu ambiente orgânico quanto com o seu ambiente inorgânico; incluindo, acima de tudo, suas relações amigáveis e não amigáveis com aqueles animais e plantas com os quais vêm direta ou indiretamente a entrar em contato – em poucas palavras, *ecologia* é o estudo de todas as inter-relações complexas denominadas por Darwin como as condições da luta pela existência.

A palavra *ecologia* passou a ser de uso geral no fim do século 19; desde aquela época, a ciência da *ecologia* cresceu e se diversificou. Os ecólogos profissionais, que agora chegam a dezenas de milhares em número, produziram um imenso volume de conhecimento sobre o mundo em torno de nós. A *ecologia* é uma ciência moderna, ativa, que continua a produzir novos e fascinantes conhecimentos sobre o meio ambiente e nosso impacto sobre ele. Como já visto na história de abertura do capítulo sobre a vida em águas profundas, a ciência é um processo contínuo pelo qual nossa compreensão da natureza muda constantemente. A investigação científica utiliza uma variedade de ferramentas para entender o modo de funcionamento da natureza. Esse entendimento nunca é completo ou absoluto, mas muda constantemente à medida que os cientistas fazem novas descobertas. Ao mesmo tempo, o rápido crescimento da população humana e a crescente sofisticação dos avanços tecnológicos causaram grandes mudanças em nosso ambiente, frequentemente com consequências dramáticas. A partir do conhecimento que os ecólogos fornecem por meio de seus estudos do mundo natural, estamos em uma posição melhor para desenvolver políticas efetivas para gerenciar os problemas ambientais relacionados com o uso de terra, água, catástrofes naturais e saúde pública.

Este capítulo mostra o caminho inicial para pensar como um ecólogo. Ao longo deste livro, consideraremos toda a gama de **sistemas ecológicos** – entidades biológicas que apresentam tanto processos internos quanto interação com o ambiente externo. Os sistemas ecológicos existem em mui-

tos níveis diferentes, que vão desde um organismo individual até todo o globo. Apesar das enormes variações no tamanho, todos os sistemas ecológicos obedecem aos mesmos princípios no que diz respeito aos seus atributos físicos e químicos, e a regulação da sua estrutura e função.

Começamos esta jornada examinando os muitos níveis diferentes de organização dos sistemas ecológicos, os princípios físicos e biológicos que regem esses sistemas, e os diferentes papéis que as espécies desempenham neles. Uma vez entendidas essas noções básicas sobre sistemas ecológicos, serão consideradas as muitas abordagens para estudar a *ecologia* e, então, a importância da compreensão da *ecologia* quando confrontada com a grande variedade de maneiras que os humanos afetam nos sistemas ecológicos.

## Os sistemas ecológicos existem em uma organização hierárquica

Um sistema ecológico pode ser um *indivíduo*, uma *população*, uma *comunidade*, um *ecossistema*, ou a toda *biosfera*. Como é possível ver na *Figura 1.1*, cada sistema ecológico é um subconjunto de um nível maior, tal que os diferentes tipos de sistemas ecológicos formam uma hierarquia. Nesta seção, serão examinados os componentes individuais dos sistemas ecológicos e como estudar *ecologia* em diferentes níveis na hierarquia ecológica.

### INDIVÍDUOS

Um **indivíduo** é um ser vivo – a unidade mais fundamental da *ecologia*. Embora existam unidades menores em biologia (p. ex., um órgão, uma célula ou uma macromolécula), nenhum deles tem uma vida em separado no ambiente. Todos os indivíduos contêm uma membrana ou outro tipo de cobertura, pela qual troca energia e matéria com seu ambiente. Essa fronteira separa os processos e as estruturas internas do sistema ecológico dos recursos e das condições externas do ambiente. No decorrer de sua vida, um indivíduo transforma energia e processa materiais. Para conseguir isso, deve adquirir energia e nutrientes do seu entorno e livrar-se de resíduos indesejados. Esse processo altera as condições do ambiente e afeta os recursos disponíveis para outros organismos. Isso também contribui para a transferência de energia e elementos químicos.

### POPULAÇÕES E ESPÉCIES

Os cientistas associam os organismos a determinadas espécies. Historicamente, o termo **espécie** foi definido como um grupo de organismos que naturalmente cruzam entre si

---

**Ecologia** O estudo científico da abundância e distribuição dos organismos em relação a outros organismos e às condições ambientais.

---

**Sistemas ecológicos** Entidades biológicas que apresentam tanto processos internos quanto interação com o ambiente externo.

---

**Indivíduo** Um ser vivo; a unidade mais fundamental da *ecologia*.

---

**Espécies** Historicamente definido como um grupo de organismos que naturalmente cruzam entre si e produzem descendentes férteis. A pesquisa atual demonstra que nenhuma definição única pode ser aplicada a todos os organismos.

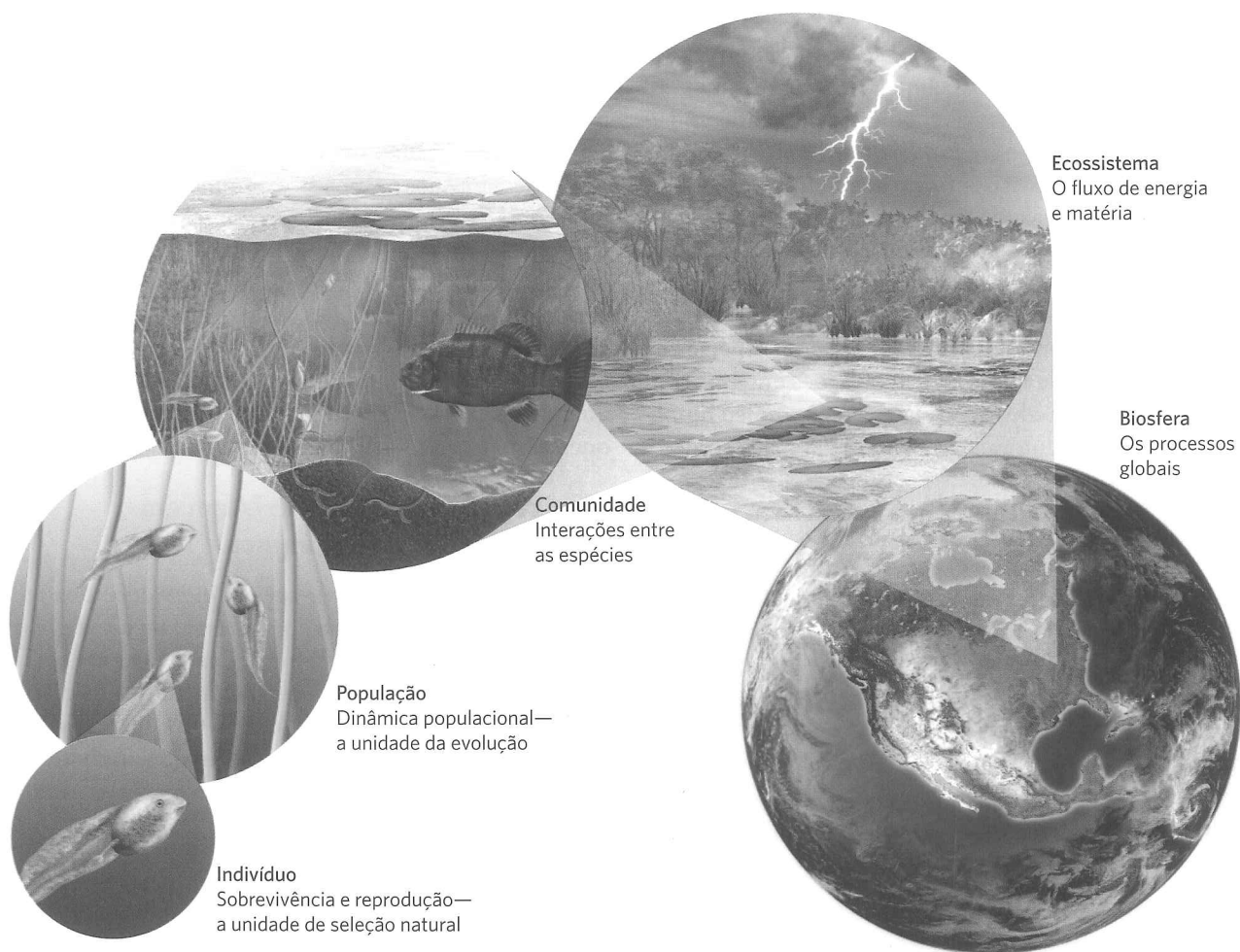


Figura 1.1 Hierarquia de organização nos sistemas ecológicos. Em cada nível de complexidade, os ecólogos estudam diferentes processos.

e produzem descendentes férteis. Com o tempo, os cientistas perceberam que essa definição não se aplica para todas as espécies, visto que nenhuma definição pode se aplicar a todos os organismos. Por exemplo, algumas espécies de salamandras são todas do sexo feminino e só produzem filhas, que são clones de suas mães. Nesse caso, os indivíduos não se cruzam, mas os consideramos indivíduos como pertencendo à mesma espécie, porque são geneticamente muito semelhantes uns aos outros. Além disso, alguns organismos que consideramos espécies distintas podem cruzar. Nos casos em que ocorre esse cruzamento, não se pode usar o isolamento reprodutivo para definir a fronteira entre as espécies.

Definir uma espécie passa a ser ainda mais complicado quando consideramos os organismos tais como as bactérias, que são procaríotas; isto é, indivíduos constituídos de uma única célula, sem um núcleo ou quaisquer outras organelas limitadas por membrana. Os cientistas avaliam cada vez mais que organismos procaríotas podem transferir partes do seu DNA para outras bactérias que não são parentes próximos, um processo conhecido como *transferência horizontal de genes*. Isso pode acontecer de diversas maneiras: quando uma bactéria engolfa material genético do ambiente, quando du-

as bactérias entram em contato e trocam material genético, ou quando um vírus transfere material genético entre duas bactérias. Esses casos tornam difícil agrupar os organismos procaríotas em espécies distintas. Apesar dessas dificuldades, o termo *espécie* ainda se prova útil para os ecólogos.

Uma **população** é composta por indivíduos da mesma espécie que vivem em uma determinada área. Por exemplo, é possível falar sobre uma população de peixe-gato que vive em um lago, uma população de lobos no Canadá, ou uma população de vermes tubulares próxima a uma chaminé hidrotermica no assoalho do oceano. Os limites que determinam uma população podem ser naturais (p. ex., onde um continente encontra o mar). Alternativamente, uma população poderia ser definida por outro critério como uma fronteira política; por exemplo, um cientista pode querer estudar a população de águias (*Haliaeetus leucocephalus*) que vive na Pensilvânia, enquanto os biólogos do US Fish and Wildlife Service poderiam querer estudar a população de águias-de-cabeça-branca dos EUA.

**População** Indivíduos da mesma espécie que vivem em uma determinada área.

As populações apresentam cinco propriedades distintas que não são exibidas por indivíduos: distribuição geográfica, abundância, densidade, mudança de tamanho e composição. A *distribuição geográfica*, também conhecida como sua distribuição, é a extensão de terra ou água na qual a população vive; por exemplo, a distribuição geográfica do urso-pardo norte-americano (*Ursus arctos*) inclui o oeste do Canadá, Alasca, Montana e Wyoming. A *abundância* refere-se ao número total de indivíduos. A *densidade* de uma população refere-se ao número de indivíduos por unidade de área; por exemplo, podemos contar os ursos-pardos em uma área e determinar que há um urso/100 km<sup>2</sup>. A *variação em tamanho* refere-se aos acréscimos e decréscimos do número de indivíduos na área. Finalmente, a *composição* descreve seu perfil em termos de gênero, idade ou genética; por exemplo, pode-se perguntar qual proporção da população de ursos-pardos é do sexo masculino *versus* feminino, ou juvenis *versus* adultos.

### COMUNIDADES

No próximo nível da hierarquia ecológica, foi identificada uma **comunidade** ecológica, que é composta por todas as populações das espécies que vivem juntas em uma determinada área. As populações de uma comunidade interagem umas com as outras de várias maneiras. Algumas espécies comem outras; enquanto algumas, como as abelhas e as plantas que polinizam, têm relações cooperativas que beneficiam ambas. Esses tipos de interações influenciam o número de indivíduos em cada população. Uma comunidade pode cobrir grandes áreas, como uma floresta, ou estar contida em uma área muito pequena, como a comunidade de pequenos organismos que vivem no sistema digestório de animais, ou em uma pequenina quantidade de água alojada em uma cavidade de uma árvore. Em termos práticos, os ecólogos que estudam comunidades não pesquisam todos os organismos contidos nela. Em vez disso, eles geralmente estudam um subconjunto dos organismos da comunidade, tais como árvores, insetos ou aves, assim como as interações entre determinados grupos de organismos.

Os limites que definem uma comunidade não são sempre rígidos. Por exemplo, se fossem examinadas as espécies de plantas e animais que vivem na base de uma montanha no Colorado, seria observado que a maioria difere das espécies de plantas e animais que vivem no topo daquela montanha. Ou seja, a base e o pico parecem ter comunidades notavelmente diferentes. No entanto, se fosse necessário subir a montanha, seriam notadas algumas espécies de árvores, como os abetos-Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), que são abundantes no início de sua caminhada e então gradualmente diminuem à medida que são alcançados locais mais elevados. Outras espécies, tais como os abetos-subalpinos (*Abies lasiocarpa*), começam a tomar o seu lugar à medida que o número de abetos-Douglas se reduz. Em outras palavras, os limites das comunidades florestais superiores e inferiores não são definidos. Por essa razão, os cientistas devem fre-

quentemente decidir sobre os limites de uma comunidade que eles desejam estudar. Por exemplo, um ecólogo pode decidir estudar a comunidade de plantas e animais em um grande rancho no deserto do Novo México, ou a comunidade de organismos aquáticos que vivem ao longo de um determinado trecho de litoral na Califórnia. Nesses casos, não há uma fronteira definida que separa a comunidade estudada da área que a rodeia.

### ECOSSISTEMAS

Passamos das comunidades para os *ecossistemas*. Um **ecossistema** é composto de uma ou mais comunidades de organismos vivos que interagem com os seus ambientes físicos e químicos, que incluem água, ar, temperatura, luz solar e nutrientes. Os ecossistemas são sistemas ecológicos complexos que podem incluir milhares de espécies diferentes que vivem sob uma grande variedade de condições. Por exemplo, pode-se falar do ecossistema dos Grandes Lagos ou o das Grandes Planícies.

No nível do ecossistema, geralmente focamos a transferência de energia e matéria entre seus componentes físicos e biológicos. A maior parte da energia que flui pelos ecossistemas tem origem da luz solar e acaba por escapar da Terra como calor irradiado. Em contraste, a matéria circula dentro dos ecossistemas e entre eles. Com a exceção de lugares como as chaminés hidrotérmicas, em que a energia é adquirida pela quimiossíntese, a energia para a maioria dos ecossistemas vem do Sol e é convertida em compostos orgânicos por plantas e algas fotossintetizantes. Esses organismos podem então ser consumidos pelos *herbívoros* (animais que comem plantas) que, por sua vez, são devorados por *carnívoros* (animais que comem outros animais). Além disso, os organismos mortos e seus produtos residuais podem ser consumidos por *detritívoros*, que também podem ser consumidos por outros animais. Em todos esses casos, cada passo resulta em parte da energia, originalmente assimilada da luz solar sendo convertida em crescimento ou reprodução dos consumidores; o restante da energia é perdido para o ambiente como calor e, em última instância, irradiado de volta para o espaço.

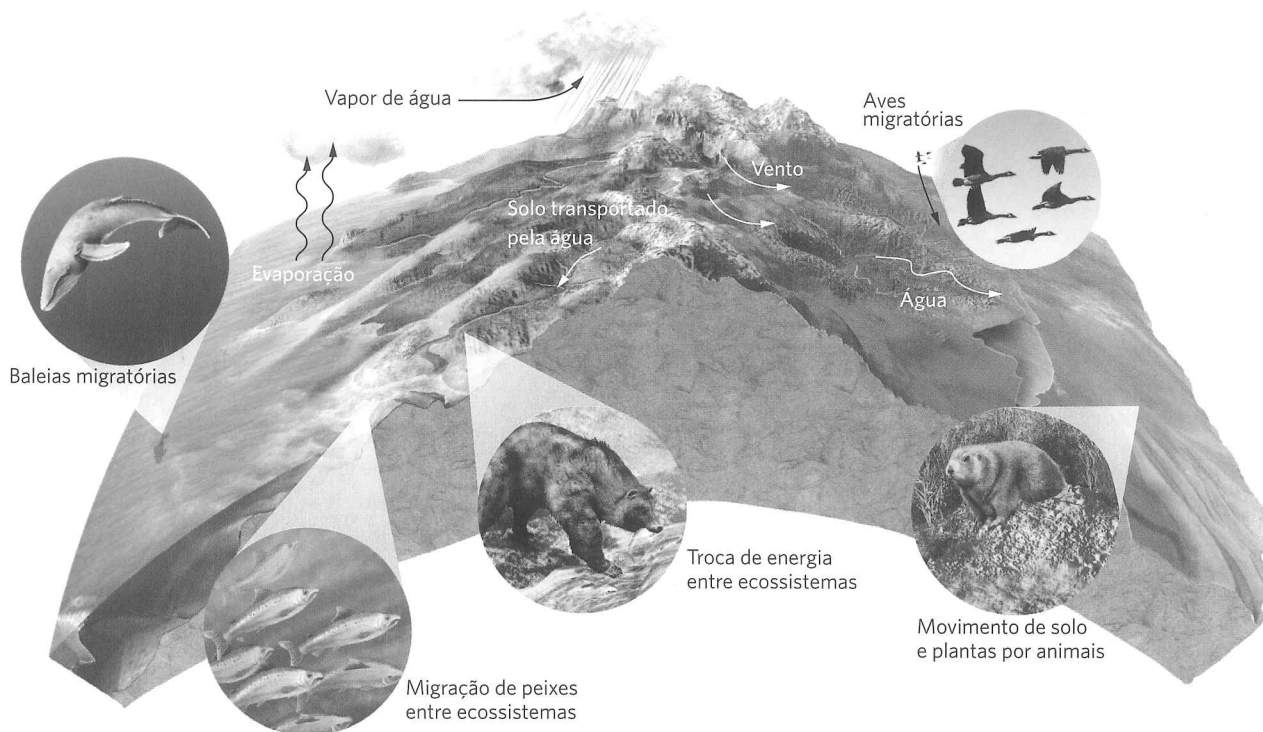
O movimento da matéria, diferentemente do movimento da energia, ocorre, em grande parte, em ciclos dentro de um ecossistema. Ao considerar a matéria em um ecossistema, geralmente olhamos para os elementos mais comuns que os organismos usam, tais como carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e fósforo. Esses elementos compreendem uma grande porção dos compostos mais importantes para os organismos vivos e incluem água, carboidratos, proteínas e DNA. Esses elementos podem ser obtidos de muitos lugares diferentes ou *fontes*, na Terra, incluindo os organismos

---

**Comunidade** Todas as populações das espécies que vivem juntas em uma determinada área.

---

**Ecossistema** Uma ou mais comunidades de organismos vivos que interagem com seus ambientes físicos e químicos.



**Figura 1.2 Biosfera.** A biosfera consiste em todos os ecossistemas da Terra, que estão ligados entre si pelos movimentos do ar, da água e dos organismos.

vivos; e, na atmosfera, na água e nas rochas. O movimento desses elementos entre essas fontes é conhecido como *fluxo* de matéria; por exemplo, muitos nutrientes que estão no solo são absorvidos pelas plantas, e estas são consumidas pelos animais. Os nutrientes existem nos tecidos de um animal, e muitos liberam resíduos como excretas. Quando o animal morre, os nutrientes nos seus tecidos são devolvidos ao solo, completando assim o ciclo dos nutrientes.

Os limites dos ecossistemas, como os das populações e comunidades, frequentemente não são definidos. Os cientistas geralmente identificam os ecossistemas pelo seu isolamento relativo com relação aos fluxos de energia e materiais; contudo, na realidade, poucos ecossistemas são completamente isolados. Até mesmo os ecossistemas aquáticos e terrestres trocam matéria e energia pelo escoamento da terra e pela captura de organismos aquáticos pelos consumidores terrestres, como quando os ursos capturam salmões em suas corridas de desova rio acima.

### BIOSFERA

No nível mais alto da hierarquia ecológica está a **biosfera**, que inclui todos os ecossistemas da Terra. Como a **Figura 1.2** ilustra, ecossistemas distantes estão conectados por trocas de energia e nutrientes transportados pelas correntes de vento e da água, e pelos movimentos de organismos como baleias, aves e peixes migratórios. Esses movimentos conectam os ecossistemas terrestre, de água doce e marinho por meio do movimento de solo, nutrientes e organismos.

A biosfera é o sistema ecológico de última instância. Todas as transformações da biosfera são internas, com duas exceções: a energia que entra a partir do Sol e a energia que é perdida para o espaço. A biosfera mantém praticamente todos os materiais que já dispõe, e retém todos os resíduos que são produzidos.

### ESTUDO DA ECOLOGIA EM DIFERENTES NÍVEIS DE ORGANIZAÇÃO

Cada nível na hierarquia dos sistemas ecológicos distingue-se por estruturas e processos exclusivos. Em consequência, os ecólogos têm desenvolvido abordagens diferentes para explorar esses níveis e responder às perguntas que surgem. As cinco abordagens para estudar a ecologia combinam os diferentes níveis de hierarquia: *indivíduo, população, comunidade, ecossistema e biosfera*.

A **abordagem de indivíduo** na ecologia enfatiza a maneira como a morfologia (o tamanho e o formato do seu corpo), a fisiologia e o comportamento de um indivíduo o capacitam para que possa sobreviver em seu ambiente. Essa abordagem também procura entender por que um organismo vive em alguns ambientes, mas não em outros. Por exemplo, um ecólogo que estuda plantas no nível de organismo poderia perguntar por que as árvores são dominantes em ambien-

**Biosfera** Todos os ecossistemas da Terra.

**Abordagem de indivíduo** Uma abordagem à ecologia que enfatiza a maneira como a morfologia, a fisiologia e o comportamento de um indivíduo o habilitam para sobreviver em seu ambiente.

tes quentes e úmidos, enquanto arbustos com folhas duras e pequenas são dominantes em ambientes com invernos frios e úmidos e verões quentes e secos.

Muitas vezes, os ecólogos que usam a abordagem de indivíduo estão interessados nas **adaptações** – as características de um organismo que o tornam bem adaptado ao seu ambiente. Por exemplo, os animais do deserto têm uma função renal aprimorada, o que os ajuda a conservar a água. A coloração críptica de muitos animais os ajuda a evitar a detecção por predadores. As flores apresentam formatos e perfumes para atrair certos tipos de polinizadores. As adaptações são o resultado da mudança evolutiva através do processo de *seleção natural*, o qual será considerado mais adiante neste capítulo.

A **abordagem de população** na ecologia examina a variação no tempo e no espaço no número, na densidade, e na composição dos indivíduos, o que inclui a razão sexual, a distribuição dos indivíduos entre as diferentes classes etárias, e a composição genética de uma população. As mudanças no número ou densidade de indivíduos podem refletir o equilíbrio entre nascimentos e mortes em uma população, assim como na imigração e emigração dos indivíduos de uma população local. Isso pode ser influenciado por diversos fatores, incluindo as interações com outras espécies e as condições físicas do ambiente, tais como a temperatura ou a disponibilidade de água. No processo de evolução, as mutações genéticas podem alterar as taxas de natalidade e mortalidade; tipos de indivíduos geneticamente distintos podem tornar-se comuns em uma população e a constituição genética total da população pode mudar. Como outras espécies poderiam servir como alimento, patógenos ou predadores, as interações entre as espécies também podem influenciar nascimentos e mortes de indivíduos em uma população.

A **abordagem de comunidade** na ecologia tem interesse na compreensão da diversidade e abundância relativa de diferentes tipos de organismos que vivem juntos em um mesmo lugar. Tal abordagem focaliza as interações entre as populações, que podem promover ou limitar a coexistência de espécies (Figura 1.3). Por exemplo, no estudo das planícies do Serengeti da África, um ecólogo que trabalha com base na abordagem de comunidades poderia perguntar como a presença de zebras, que consomem gramíneas, poderia afetar a abundância de outras espécies, tais como gazelas, que também consomem as gramíneas.

A **abordagem de ecossistema** na ecologia descreve o armazenamento e a transferência de energia e matéria, incluindo os vários elementos químicos essenciais à vida, tais como oxigênio, carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre. Essas transferências de energia e matéria ocorrem por meio das atividades de organismos e pelas transformações físicas e químicas presentes no solo, atmosfera e água.

A **abordagem de biosfera** na ecologia se preocupa com a maior escala na hierarquia dos sistemas ecológicos. Essa abordagem trabalha com os movimentos do ar e da água – e



**Figura 1.3** Abordagem de comunidade na ecologia. Os ecólogos que usam a abordagem de comunidade estudam as interações entre plantas e animais que vivem juntos. Por exemplo, em uma planície africana, os ecólogos poderiam questionar como os guepardos afetam a abundância das gazelas e como estas afetam a abundância das plantas que consomem. (Fotografia de Michel e Christine Denis-Huot/Photo Researchers, Inc.)

a energia e os elementos químicos que eles contêm – em toda a superfície da Terra. As correntes oceânicas e os ventos transportam o calor e a umidade que definem os climas em cada local na Terra, os quais, por sua vez, governam as distribuições dos organismos, a dinâmica das populações, a composição das comunidades e a produtividade dos ecossistemas.

Descrevemos essas cinco abordagens de maneiras distintas. No entanto, a maioria dos ecólogos emprega abordagens múltiplas para estudar o mundo natural. Um cientista que pretende entender como um ecossistema responderá a uma seca, por exemplo, provavelmente vai querer saber como cada planta e animal responde à falta de água, como essas respostas individuais afetam as populações de plantas e animais, como uma mudança nas populações poderia afetar as interações entre as espécies e como uma alteração nas interações das espécies poderia afetar uma mudança no fluxo de energia e de matéria.

---

**Adaptação** Uma característica de um organismo que o torna bem adaptado ao seu ambiente.

---

**Abordagem de população** Uma abordagem na ecologia que enfatiza a variação no espaço e no tempo no número, na densidade e na composição dos indivíduos.

---

**Abordagem de comunidade** Uma abordagem na ecologia que enfatiza a diversidade e a abundância relativa de diferentes tipos de organismos que vivem juntos em um mesmo lugar.

---

**Abordagem de ecossistema** Uma abordagem na ecologia que enfatiza o armazenamento e a transferência de energia e matéria, incluindo os vários elementos químicos essenciais à vida.

---

**Abordagem de biosfera** Uma abordagem na ecologia que se preocupa com a maior escala na hierarquia dos sistemas ecológicos, incluindo os movimentos do ar e da água – e a energia e os elementos químicos que eles contêm – na superfície da Terra.



## Os sistemas ecológicos são governados por princípios físicos e biológicos

Embora os sistemas ecológicos sejam complexos, eles são regidos por alguns poucos princípios básicos. A vida se constrói nas propriedades físicas e reações químicas da matéria. A difusão de oxigênio através de superfícies do corpo, as taxas de reações químicas, a resistência dos vasos ao fluxo de fluidos e a transmissão de impulsos nervosos obedecem às leis da termodinâmica. Dentro dessas limitações, a vida pode buscar muitas opções, e tem feito isso com inovação surpreendente. Nesta seção, serão brevemente revistos os três grandes princípios biológicos ensinados no curso introdutório de biologia: *conservação da matéria e da energia*, *estados de equilíbrio dinâmico* e *evolução*.

### CONSERVAÇÃO DA MATÉRIA E ENERGIA

A **lei da conservação da matéria** estabelece que esta não pode ser criada ou destruída, apenas mudar de forma. Por exemplo, enquanto você dirige um carro, a gasolina é queimada no motor; a quantidade de combustível no tanque diminui, mas você não está destruindo a matéria. As moléculas que compõem a gasolina são convertidas em novas formas, incluindo monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O).

Outro princípio biológico importante, a **primeira lei da termodinâmica** (também conhecida como a **lei da conservação de energia**) estabelece que energia não pode ser criada ou destruída. Assim como a matéria, a energia somente pode ser convertida em diferentes formas. Os organismos vivos devem constantemente obter energia para crescer, manter seus corpos e substituir a energia perdida em forma de calor.

A lei da conservação da matéria e a primeira lei da termodinâmica implicam que os ecólogos podem rastrear o movimento de matéria e energia à medida que elas são convertidas em novas formas por meio de organismos, populações, comunidades, ecossistemas e biosfera. Em todos os níveis de organização, devemos ser capazes de determinar a quantidade de matéria que entra no sistema e levar em conta o seu movimento. Por exemplo, considere um campo cheio de bovinos (*Bos taurus*) que come as gramíneas. No nível do organismo, podemos determinar quanta energia cada animal consome e, então, calcular a proporção dessa energia que é convertida em crescimento de seu corpo, manutenção de sua fisiologia e rejeitos. No nível de população, é possível calcular a quantidade de energia que todo o rebanho de gado consome por comer gramíneas. No nível da comunidade, podemos avaliar quanta energia cada espécie de gramínea cria via fotossíntese e quanto dessa energia é passada para o gado e outras espécies de herbívoros (p. ex., coelhos) que poderiam coexistir com o gado. No nível do ecossistema, podemos estimar como alguns elementos (p. ex., carbono) fluem das gramíneas para os herbívoros (bovinos e coelhos) e então para os predadores. Podemos então rastrear como

as gramíneas mortas, os produtos residuais de herbívoros e predadores, e os herbívoros e predadores mortos se decompõem e retornam ao solo.

### ESTADOS DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

Embora a matéria e a energia não possam ser criadas ou destruídas, os sistemas ecológicos trocam matéria e energia de maneira contínua com seu ambiente. Quando os ganhos e perdas estão em equilíbrio, os sistemas ecológicos ficam inalterados e é possível afirmar que o sistema está em um **estado de equilíbrio dinâmico**. Por exemplo, as aves e os mamíferos perdem continuamente calor em um ambiente frio. No entanto, esta perda é equilibrada pelo ganho de calor a partir do metabolismo de alimentos; então, a temperatura do corpo do animal se mantém constante. Da mesma maneira, as proteínas do nosso corpo são constantemente quebradas e substituídas por novas proteínas recém-sintetizadas; por essa razão, a nossa aparência permanece relativamente inalterada.

O princípio do estado de equilíbrio dinâmico aplica-se a todos os níveis de organização ecológica, como ilustrado na Figura 1.4. Para cada indivíduo, o alimento e a energia assimilados devem equilibrar o gasto de energia e a quebra metabólica dos tecidos. A população aumenta com nascimentos e imigração, e diminui com morte e emigração. No nível da comunidade, o número de espécies que vivem nelas diminui quando uma espécie se extingue, e aumenta quando uma nova espécie coloniza a área. Os ecossistemas e a biosfera recebem a energia do Sol, e esse ganho é compensado pela energia do calor irradiado pela Terra de volta para o espaço. Uma das questões mais importantes para os ecólogos é o modo como os estados de equilíbrio dos sistemas ecológicos são mantidos e regulados. Essa questão será retomada com frequência ao longo deste livro.

Uma compreensão de estados de equilíbrio dinâmico ajuda a fornecer *insights* relacionados com as entradas e saídas de sistemas ecológicos. Naturalmente, os sistemas ecológicos também mudam. Os organismos crescem, as populações variam em abundância, e campos abandonados se transformam em florestas. No entanto, todos os sistemas ecológicos têm mecanismos que tendem a manter um estado de equilíbrio dinâmico.

### EVOLUÇÃO

Embora a matéria e a energia não possam ser criadas ou destruídas, o que os sistemas vivos fazem com elas é tão variável quanto todas as formas de organismos que já exis-

---

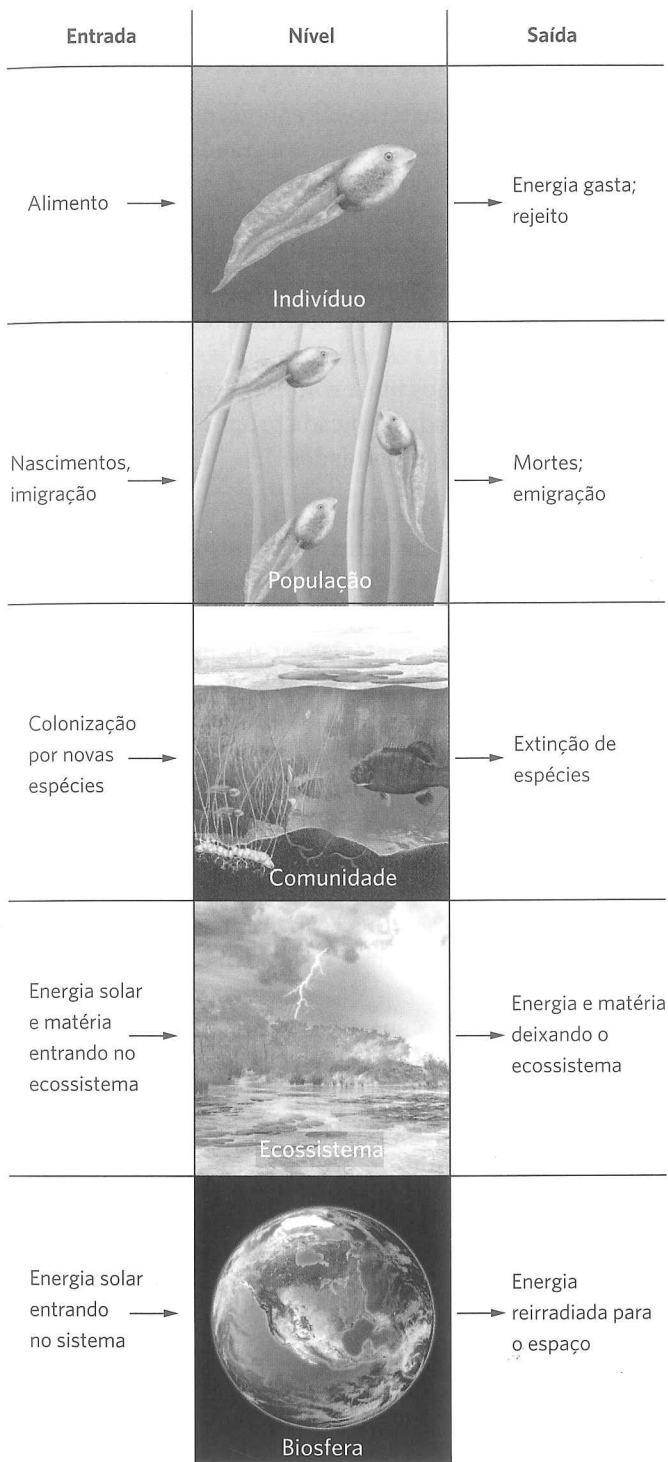
**Lei da conservação da matéria** A matéria não pode ser criada ou destruída, somente mudar de forma.

---

**Primeira lei da termodinâmica** A energia não pode ser criada ou destruída, somente pode mudar de forma. Também conhecida como **Lei da conservação de energia**.

---

**Estado de equilíbrio dinâmico** Quando os ganhos e perdas dos sistemas ecológicos estão em equilíbrio.



**Figura 1.4** Estados de equilíbrio dinâmico. As entradas para os sistemas devem igualar as saídas em todos os níveis de organização.

tiram na Terra. Para entender a variação nos organismos – a diversidade da vida – voltamos para o conceito de *evolução*.

Em um organismo, um atributo como o seu comportamento, morfologia ou fisiologia, constitui o seu **fenótipo**. Este é determinado pela interação do **genótipo** do organismo, ou o conjunto de genes que transporta, com o ambiente

no qual vive. Por exemplo, sua altura é um fenótipo determinado pelos seus genes e nutrientes recebidos no ambiente em que foi criado.

Ao longo da história da vida na Terra, os fenótipos dos organismos vêm mudando e se diversificando dramaticamente. Esse é o processo da **evolução**, uma mudança na composição genética de uma população através do tempo. A evolução pode acontecer por meio de diversos processos diferentes, os quais serão discutidos em detalhes em capítulos posteriores. Talvez o processo mais conhecido seja a evolução pela **seleção natural**, que é uma mudança na frequência de genes em uma população por meio de sobrevivência diferencial e reprodução dos indivíduos que apresentam certos fenótipos. Como realçado por Charles Darwin, em seu livro *A origem das espécies*, a evolução pela seleção natural depende de três condições:

1. Organismos individuais variam em seus atributos.
2. Os atributos parentais são herdados por seus descendentes.
3. A variação nos atributos faz com que alguns indivíduos experimentem maior **aptidão**, que é definida como sua sobrevivência e reprodução.

Quando há essas três condições, um indivíduo com maior índice de sobrevivência e sucesso reprodutivo passará mais cópias de seus genes para a próxima geração. Ao longo do tempo, a composição genética de uma população muda à medida que os fenótipos mais bem-sucedidos se tornam predominantes. Em consequência, a população torna-se mais adaptada para as condições ambientais circundantes. Os fenótipos que são bem adaptados aos seus ambientes e, por sua vez, conferem maior aptidão, são conhecidos como adaptações. Considere o exemplo da *Figura 1.5*, em que alguns indivíduos em uma população de lagartas são coloridos de tal maneira, que se confundem com o meio circundante e assim escapam dos predadores, enquanto outros indivíduos não são. Caso a cor seja herdada, a população será, ao longo do tempo, constituída de uma proporção cada vez maior de lagartas que se confundem com o seu ambiente.

As espécies não evoluem em isolamento. A evolução em uma espécie abre novas possibilidades para mudanças evolutivas, tanto na espécie que está evoluindo quanto nas outras que interagem com ela. Por exemplo, as lagartas da

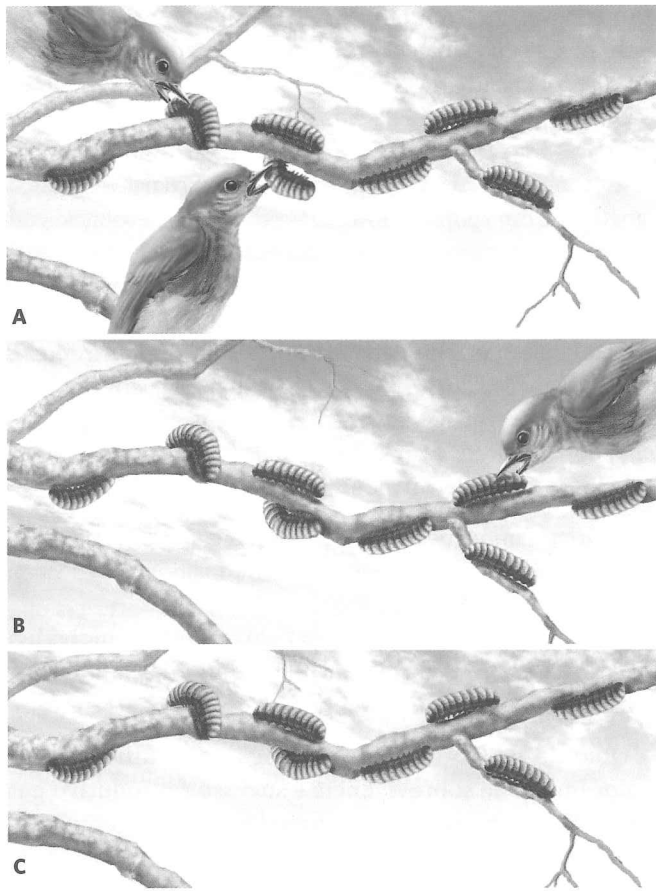
**Fenótipo** Atributos de um organismo, tais como comportamento, morfologia, ou fisiologia.

**Genótipo** Conjunto de genes que um organismo carrega.

**Evolução** Mudança na composição genética de uma população ao longo do tempo.

**Seleção natural** Alteração na frequência de genes em uma população por meio de sobrevivência diferencial e reprodução de indivíduos que apresentam certos fenótipos.

**Aptidão** Sobrevivência e reprodução de um indivíduo.



**Figura 1.5** Evolução pela seleção natural. Neste exemplo, a população de lagartas é inicialmente bastante variável na coloração (A). Indivíduos que melhor se confundem com os galhos são menos óbvios à predação por aves que buscam alimento e, portanto, têm mais chances de sobreviver. Se a cor for herdada geneticamente, a próxima geração (B), da população de lagartas será mais adaptada para se parecer com os galhos. Como a seleção natural continua ao longo de muitas gerações, a cor da população de lagartas irá corresponder à coloração dos galhos (C). Nesta fase, a cor da lagarta representa uma adaptação contra predadores.

borboleta monarca (*Danaus plexippus*) desenvolveram a capacidade de comer as folhas das asclépias (*milkweeds*), que são tóxicas para as lagartas de outras espécies. Além de tolerarem esses compostos tóxicos, as lagartas das borboletas monarca também os absorvem em seus corpos e utilizam sua toxicidade para se defender, tanto como larvas quanto como adultos, contra aves predadoras. Tanto as larvas quanto os adultos desenvolveram uma notável coloração de advertência para anunciar a sua toxicidade. Após as espécies de lagartas desenvolverem essas habilidades defensivas, as aves predadoras desenvolveram uma nova capacidade de discernir entre lagartas e borboletas tóxicas das comestíveis.

A complexidade das comunidades ecológicas e de ecossistemas tem como base e é promovida pela complexidade existente. Os ecólogos tentam entender a maneira como esses sistemas ecológicos complexos surgiram e seu funcionamento em seus ambientes.

## Diferentes organismos desempenham diversos papéis nos sistemas ecológicos

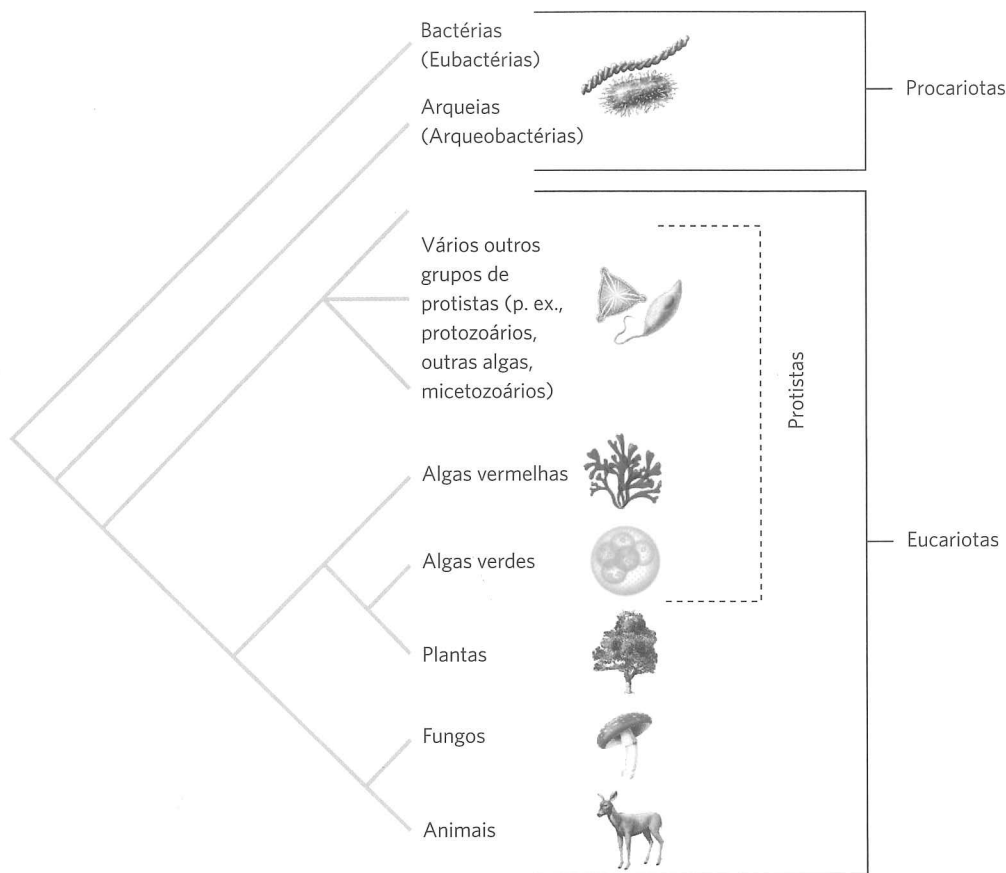
Transformações da matéria e da energia nos sistemas ecológicos são realizadas por pequenas e grandes formas de vida. Esses organismos diferentes podem desempenhar papéis únicos nos sistemas ecológicos. Nesta seção, examinaremos como os organismos interagem entre si e com o ambiente. Verificaremos a maneira que os ecólogos classificam as espécies com base no modo como obtêm sua energia e como interagem com outras espécies; serão descritos os grandes grupos de organismos que evoluíram e os diversos papéis ecológicos encontrados em cada grupo; e os conceitos de *habitat* e *nicho* serão examinados.

### PADRÕES GERAIS DE EVOLUÇÃO

No início da história da Terra, os ecossistemas eram dominados por bactérias. A evolução desses grupos antigos ainda é debatida por cientistas, mas a principal hipótese, ilustrada na Figura 1.6, é que as bactérias são o grupo mais antigo de organismos. Ao longo do tempo, as bactérias deram origem às arqueias. Tanto as bactérias quanto as arqueias são organismos *procariotas*, unicelulares, que não contêm organelas celulares distintas, tais como um núcleo. Esses eventos evolutivos provavelmente aconteceram no oceano e podem ter ocorrido perto das chaminés hidrotérmicas, sobre as quais discutimos na abertura deste capítulo. Sendo assim, pode também ser o caso de que as primeiras bactérias utilizaram a quimiossíntese e esta, mais tarde, deu origem à evolução da fotossíntese.

Ao longo do tempo, surgiram os organismos *eucariotas*, os quais apresentam organelas celulares distintas. O evento-chave na evolução dos eucariotas ocorreu quando uma bactéria assimilou outra. A bactéria assimilada tornou-se o que hoje conhecemos como *mitocôndria*, uma organela importante para a respiração celular nos organismos eucariotas. Posteriormente, esse ancestral deu origem a todos os organismos modernos que contêm mitocôndrias, incluindo algas vermelhas, algas verdes, plantas, fungos e animais. À medida que a evolução dos eucariotas progrediu, houve um segundo evento-chave. Uma célula eucariota assimilou uma bactéria que era capaz de realizar fotossíntese, e a bactéria assimilada evoluiu para o que hoje conhecemos como cloroplasto. Mais tarde, o grupo de organismos eucariotas que continham cloroplastos deu origem às modernas algas vermelhas, algas verdes e plantas. As espécies que não continham cloroplastos deram origem a fungos e animais dos dias atuais.

As bactérias também modificaram a biosfera, tornando-a possível para que haja outras formas de vida. Por exemplo, as bactérias fotossintéticas que estavam presentes há mais de 3 bilhões de anos produziram oxigênio como subproduto da fotossíntese. As maiores concentrações de oxigênio na atmosfera e oceanos favoreceram a evolução das formas de vida adicionais que consumiam oxigênio, como as plantas e



**Figura 1.6 Evolução da vida na Terra.** As bactérias são as mais antigas formas de vida na Terra. Uma espécie bacteriana, ao ser assimilada por outra, levou ao surgimento dos eucariotas contendo organelas celulares como as mitocôndrias e os cloroplastos.

animais. Apesar de todas essas mudanças, as bactérias têm persistido até o presente. Como veremos, suas capacidades bioquímicas únicas possibilitam a elas consumir recursos, que seus descendentes mais complexos não podem usar, e tolerar condições ecológicas que estão além das capacidades dos outros organismos.

Os ecossistemas dependem das atividades de muitas formas de vida. Cada grande grupo desempenha um papel único e necessário na biosfera. A seguir, serão brevemente revistos os grandes grupos de organismos, incluindo bactérias, protistas, plantas, fungos e animais.

### **Bactéria**

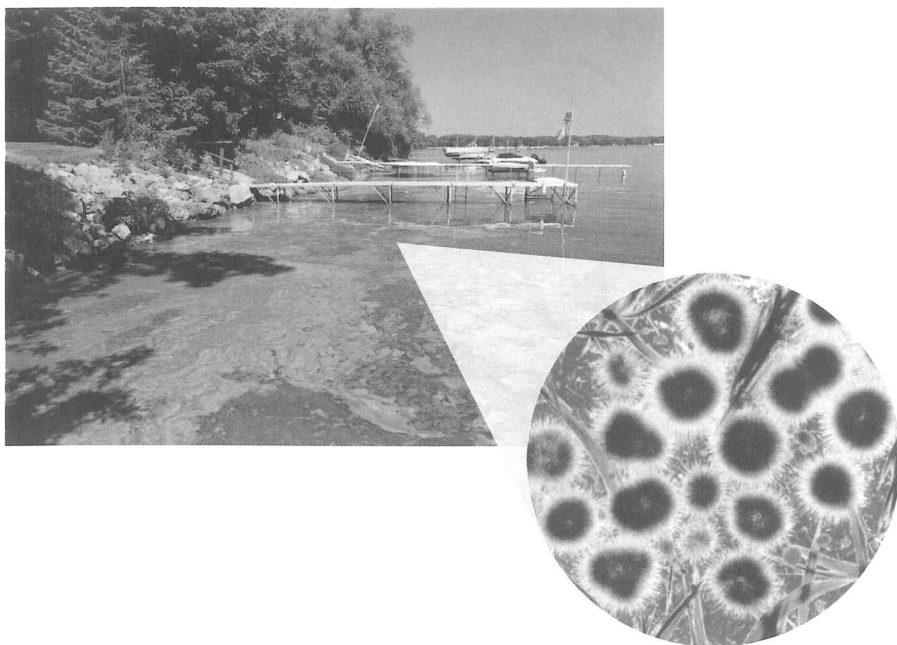
Embora as bactérias sejam minúsculas, sua enorme gama de capacidades metabólicas possibilita que elas realizem muitas transformações bioquímicas únicas e ocupem partes da biosfera em que as plantas, os animais, os fungos e a maioria dos protistas não podem sobreviver. Algumas bactérias podem assimilar o nitrogênio molecular ( $N_2$ ) da atmosfera que utilizam para sintetizar proteínas e ácidos nucleicos. Outras espécies de bactérias, como as que vivem em chaminés hidrotermais no solo oceânico, podem usar compostos inorgânicos como o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) como fontes de energia na quimiossíntese. Além disso, muitas bactérias podem viver em condições anaeróbicas (nas quais não há oxigênio

livre) como em solos e sedimentos pantanosos, em que suas atividades metabólicas liberam nutrientes que podem ser absorvidos pelas plantas. Finalmente, algumas bactérias, incluindo as cianobactérias (coloquialmente conhecidas como algas azuis), podem realizar a fotossíntese. As cianobactérias são responsáveis por uma grande fração da fotossíntese que ocorre nos ecossistemas aquáticos. Quando corpos de água contêm quantidades elevadas de nutrientes, as cianobactérias podem formar densas populações que fazem a água ficar verde, um evento conhecido como **bloom de algas** (Figura 1.7). Mais adiante, teremos muito mais a ser abordado sobre o papel especial de bactérias nos ecossistemas.

### **Protistas**

Os protistas são um grupo muito diversificado, composto, em sua maioria, de organismos eucariotas unicelulares, incluindo as algas, os micetozoários e os protozoários. Esta variedade desconcertante de protistas preenche quase todos os papéis ecológicos. Por exemplo, as algas são os organismos fotossintetizantes primários na maioria dos ecossistemas aquáticos. Algumas algas podem formar grandes estruturas semelhantes a plantas, como a alga conhecida

**Bloom de algas** Um rápido aumento no crescimento de algas em ambientes aquáticos, normalmente devido a um afluxo de nutrientes.



**Figura 1.7** Cianobactérias. Também conhecidas como algas azuis, as cianobactérias são bactérias capazes de realizar a fotossíntese. Estes organismos podem crescer rapidamente em condições altamente férteis, produzindo grandes tapetes flutuantes na água, que podem ser tóxicos para os animais, como ilustrado nesta fotografia do Lago de Mendota, Wisconsin. (Fotografias por Lee Wilcox [superior] e MI [Spike] Walker/Alamy [no detalhe].)

como *kelp*, que pode crescer até 100 m de comprimento. Devido ao seu grande tamanho, as regiões do oceano com grandes quantidades de *kelps*, como o mostrado na Figura 1.8, são chamadas de florestas de *kelps*. Embora as *kelps* possam parecer plantas grandes, a organização real dos tecidos da *kelp* é estruturalmente menos complexa que a das árvores e outras plantas.

Outros protistas não são fotossintetizantes. Os foraminíferos e os radiolários são protistas que se alimentam de pequenas partículas de matéria orgânica ou absorvem pequenas moléculas orgânicas dissolvidas. Alguns dos protozoários ciliados são predadores efetivos de outros microrga-

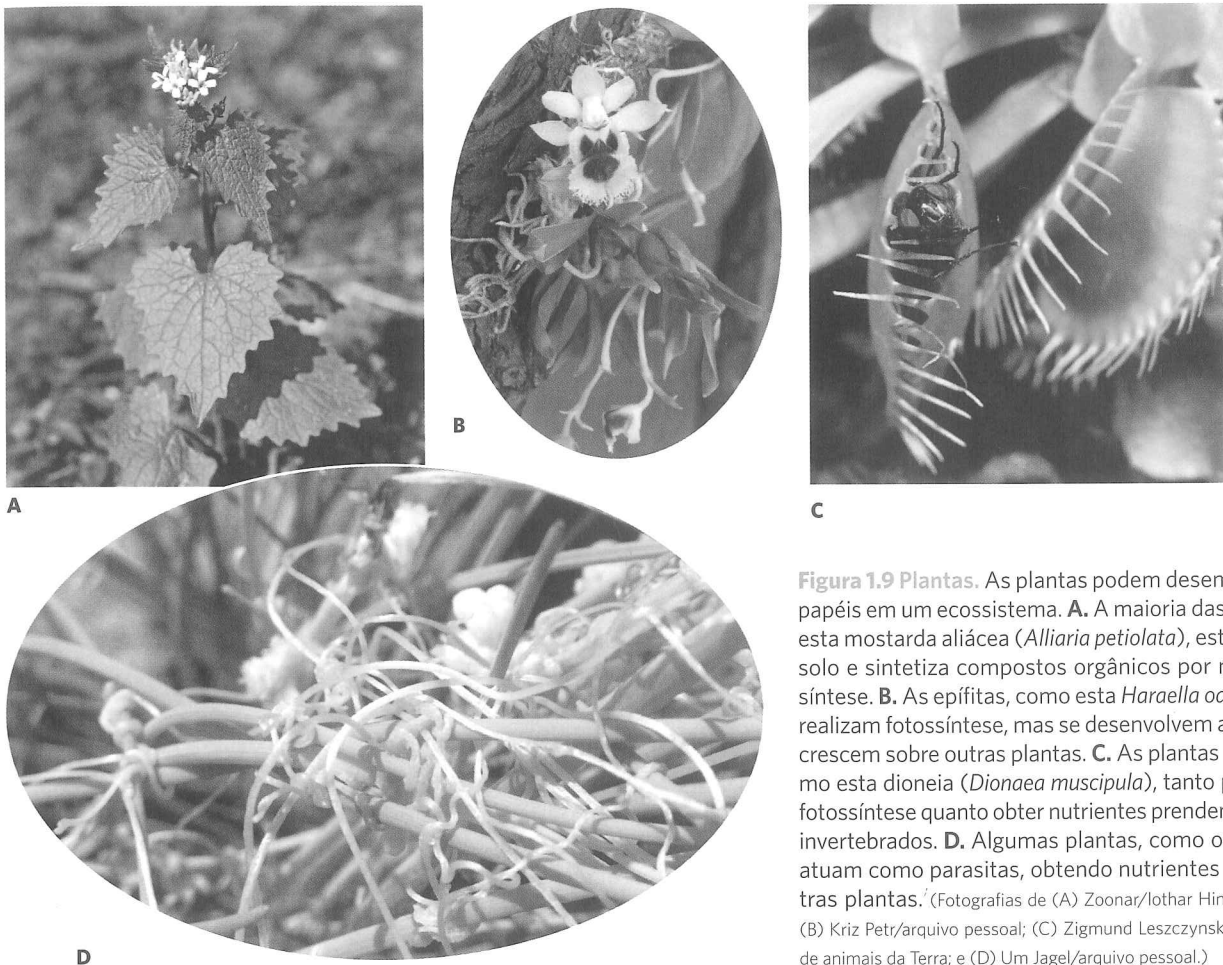
nismos. Muitos protistas vivem nas vísceras ou em outros tecidos de um organismo hospedeiro, aos quais podem ser úteis ou causar danos. Por exemplo, os cupins são um tipo de inseto que consome grandes quantidades de celulose. A celulose é uma substância de digestão muito difícil para animais, mas o cupim tem uma comunidade de protistas (assim como bactérias) em seu intestino, que são muito efetivos para quebrar as moléculas de celulose. Alguns dos protistas nocivos mais conhecidos incluem o *Plasmodium*, que causa a malária em humanos, e o *Trypanosoma brucei*, que causa a doença do sono.

### Plantas

As plantas são bem conhecidas pelo seu papel no uso da energia do Sol para sintetizar moléculas orgânicas a partir de  $\text{CO}_2$  e da água. Na terra, a maioria das plantas têm estruturas com grandes superfícies expostas – suas folhas – para captar energia da luz do Sol (Figura 1.9A). As folhas são delgadas porque a área de superfície é mais importante que a espessura da folha para captar a energia da luz. Para obter o carbono, as plantas terrestres absorvem  $\text{CO}_2$  gasoso da atmosfera. Ao mesmo tempo, elas perdem grandes quantidades de água por evaporação de seus tecidos foliares para a atmosfera. Assim, as plantas precisam de um fornecimento constante de água para repor a água perdida durante a fotossíntese. A maioria das plantas está firmemente enraizada no solo e em contato constante com a água contida nele. Outras, incluindo as orquídeas e diversas “plantas aéreas” tropicais (conhecidas como *epífitas*), normalmente crescem, prendendo-se a outras plantas – geralmente os troncos das árvores –, e podem fotossintetizar em ambientes úmidos que são tocados por nuvens (Figura 1.9B).



**Figura 1.8** Florestas de *kelp*. Embora a maioria dos protistas seja muito pequena, alguns como as algas marinhas podem crescer muito e parecer com grandes plantas. Esta floresta de *kelp* está localizada ao largo da costa do sul da Califórnia. (Fotografia de Mark Conlin/Imagem da Quest Marine.)



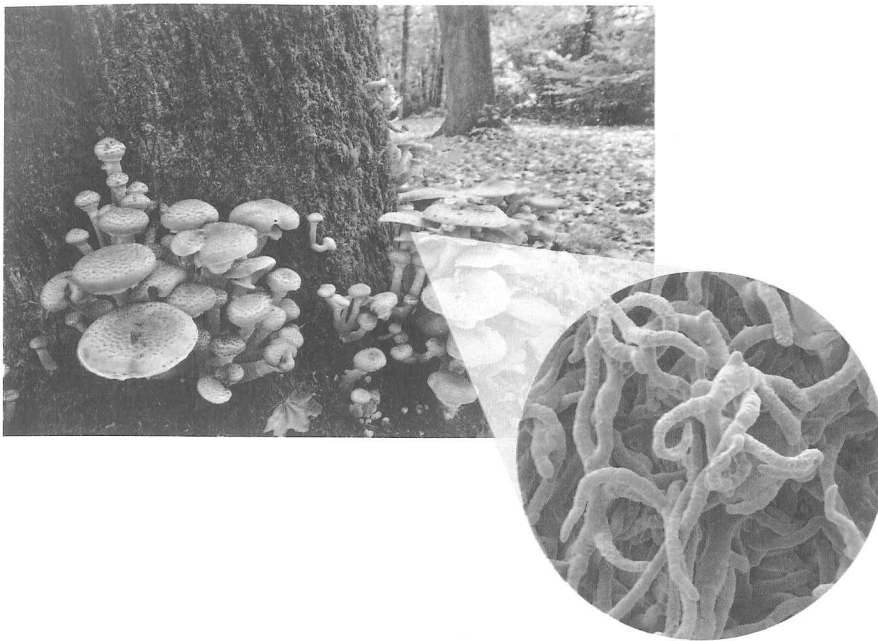
**Figura 1.9 Plantas.** As plantas podem desempenhar vários papéis em um ecossistema. **A.** A maioria das plantas, como esta mostarda aliécea (*Alliaria petiolata*), está enraizada no solo e sintetiza compostos orgânicos por meio da fotossíntese. **B.** As epífitas, como esta *Haraella odorata*, também realizam fotossíntese, mas se desenvolvem acima do solo e crescem sobre outras plantas. **C.** As plantas carnívoras, como esta dioneia (*Dionaea muscipula*), tanto podem realizar fotossíntese quanto obter nutrientes prendendo e digerindo invertebrados. **D.** Algumas plantas, como o cipó-chumbo, atuam como parasitas, obtendo nutrientes a partir de outras plantas. (Fotografias de (A) Zoonar/Iohtar Hinz/arquivo pessoal; (B) Kriz Petr/arquivo pessoal; (C) Zigmund Leszczynski/Animals - Cenas de animais da Terra; e (D) Um Jagel/arquivo pessoal.)

Embora normalmente entendemos plantas como organismos que obtêm sua energia da luz solar, elas também podem obter energia por outros meios. Por exemplo, vários grupos de plantas evoluíram para ser simultaneamente fotossintetizantes e carnívoros. Estas plantas incluem a dioneia (*Dionaea muscipula*), várias espécies de dróseras e de “plantas-tanque” (*pitcher plants*) (Figura 1.9C). Muitas vezes, elas vivem em locais com baixos índices de nutrientes, de modo que os invertebrados capturados e consumidos fornecem uma fonte adicional de nutrientes e energia. Além disso, mais de 400 espécies de plantas – incluindo mais de 200 espécies de orquídeas – não dispõem de clorofila e, portanto, não podem realizar fotossíntese para obter energia. Os cientistas pensavam que essas plantas agiam como decompositores e obtinham seu carbono orgânico a partir de matéria orgânica morta, mas agora sabe-se que muitas dessas plantas, na verdade, agem como parasitas de fungos, que são os reais decompositores no ecossistema. Essas plantas parasitas obtêm a maioria de seu carbono orgânico dos fungos. Outras plantas, como o cipó-chumbo, têm pouca clorofila e nenhuma raiz (Figura 1.9D). Em vez disso, as plantas visgosas – também conhecidas como *Cuscuta* – se enroscam em

torno de outras plantas, penetram seus tecidos e sugam a água, os nutrientes e os produtos da fotossíntese. O cipó-chumbo é uma praga grave para muitas culturas agrícolas.

### Fungos

Os fungos assumem papéis únicos na biosfera por conta de sua forma de crescimento distinta. Com exceção de leveduras unicelulares e seus parentes, os fungos – assim como plantas e animais – são multicelulares. A maioria dos organismos fúngicos consiste em estruturas filamentosas chamadas hifas, que têm somente uma única célula de diâmetro. Essas hifas tanto podem formar uma rede frouxa, que pode invadir os tecidos vegetais ou animais ou folhas mortas e madeira na superfície do solo, ou crescer agregadas em estruturas reprodutivas, como cogumelos (Figura 1.10). Como as hifas fúngicas são capazes de penetrar profundamente nos tecidos, elas prontamente decompõem material vegetal morto, que vem a formar os nutrientes disponíveis para outros organismos. Os fungos digerem seus alimentos externamente e secretam ácidos e enzimas em suas imediações. Esse tipo de digestão possibilita aos fungos decompor organismos mortos e dissolver os nutrientes minerais do solo.



**Figura 1.10 Fungos.** Os cogumelos produzidos por este fungo (*Hypholoma fasciculare*) na Bélgica são corpos de frutificação de massas de filamentos de hifas invisíveis e muito maiores, que penetram a madeira e a serapilheira em decomposição. Os fungos são decompositores efetivos. (Fotografias de Philippe Clement/naturepl.com [superior] e Steve Gschmeissner/Photo Researchers, Inc. [inserção].)

Embora a maioria dos fungos funcione como decompositores, eles podem interagir com outras espécies em ambos os papéis positivos e negativos. Muitos fungos vivem em relações mutualísticas com as plantas, e vivem dentro ou em torno das raízes das plantas. Usando sua extensa rede de hifas, os fungos obtêm nutrientes escassos do solo circundante e os fornecem para a planta; em troca, a planta fornece os produtos da fotossíntese. Outros fungos, no entanto, podem atuar como patógenos. Várias espécies proximamente aparentadas de fungos causam a doença do olmo-holandês, o que provocou a morte generalizada de várias espécies de árvores de olmo em toda a América do Norte e Europa durante os últimos 100 anos. Fungos patogênicos também são um grande problema para muitas culturas, incluindo batata, trigo e arroz.

**Animais**

Os animais desempenham uma grande variedade de papéis como consumidores nos sistemas ecológicos. Alguns animais (p. ex., elefantes, gazelas e ratos) comem plantas; outros

(p. ex., leões-da-montanha, cascavéis e sapos) comem outros animais. Os carrapatos, os piolhos e as tênias são animais que vivem sobre ou dentro de outros organismos. Finalmente, animais como moscas, abelhas, borboletas, mariposas e morcegos podem servir como importantes polinizadores de plantas e dispersores de sementes.

**CLASSIFICANDO ESPÉCIES COM BASE EM FONTES DE ENERGIA**

Os ecólogos geralmente classificam os organismos de acordo com a forma como eles obtêm energia, como ilustrado na **Figura 1.11**. Os organismos que usam a fotossíntese para converter a energia solar em compostos orgânicos ou que utilizam a quimiossíntese para converter energia química em compostos orgânicos são conhecidos como **produtores** ou **autótrofos**. Os organismos que obtêm

**Produtor** Organismo que usa a fotossíntese para converter a energia solar em compostos orgânicos ou que usa quimiossíntese para converter energia química em compostos orgânicos. *Também conhecido como autótrofo.*

**Figura 1.11** Categorias de espécies com base em suas fontes de energia. As espécies que obtêm sua energia da fotossíntese ou quimiossíntese são conhecidas como produtoras ou autótrofas. As espécies que obtêm sua energia a partir do consumo de outras espécies são heterótrofas. As espécies que podem assumir uma estratégia mista como produtoras e heterótrofas são mixotrófas.

Produtores (autótrofos)		Nutrição mista (mixotrófas)	Consumidores (heterótrofos)	



**Figura 1.12 Os quatro tipos de consumidores.** Os predadores podem ser divididos em predadores, como leões-da-montanha; parasitoides, como as vespas braconídeas mostradas aqui em uma lagarta-do-tomateiro; parasitas, como carrapatos de inverno; e herbívoros, como bisões.

sua energia de outros organismos são conhecidos como **consumidores** ou **heterótrofos**. Há muitos tipos diferentes de heterótrofos; alguns consomem plantas; outros, animais e, alguns, matéria orgânica morta. Na próxima seção, essas várias interações serão discutidas com mais detalhes.

Nem todas as espécies se encaixam perfeitamente na classificação de autótrofos ou heterótrofos. Algumas espécies podem obter as suas fontes de carbono de várias formas. Como essas espécies adotam uma abordagem mista para obter sua energia, são chamadas **mixótrofas**, as quais são bastante comuns na natureza. Por exemplo, algumas bactérias podem alternar entre fotossíntese e quimiossíntese. Além disso, muitas espécies de algas podem realizar fotossíntese e também obter o carbono orgânico assimilando bactérias, protistas e fragmentos de carbono orgânico existentes na água. Outras mixótrofas incluem as plantas carnívoras, anteriormente discutidas neste capítulo; tais plantas obtêm sua energia tanto de fotossíntese quanto do consumo de invertebrados.

#### TIPOS DE INTERAÇÃO ENTRE ESPÉCIES

Ao considerar a diversidade de espécies que existem na Terra, geralmente nos interessamos pelos papéis que desempenham. Os ecólogos classificam as espécies pelos ti-

pos de interações que elas têm com outras espécies, como é possível observar nos exemplos da **Figura 1.12**. A seguir, está uma breve introdução a essas interações, começando com os vários tipos de consumidores, sendo cada um deles abordado com muito mais detalhes em capítulos posteriores.

#### Predação

Os **predadores** são organismos que matam e consomem parcial ou totalmente outro indivíduo. O leão-da-montanha, por exemplo, é um predador que mata veados-de-cauda-branca (*Odocoileus virginianus*) e muitas outras espécies de presas.

Os **parasitoides** representam um tipo especial de predador. Eles colocam seus ovos sobre ou dentro de outros animais, especialmente insetos, e os ovos eclodem em larvas

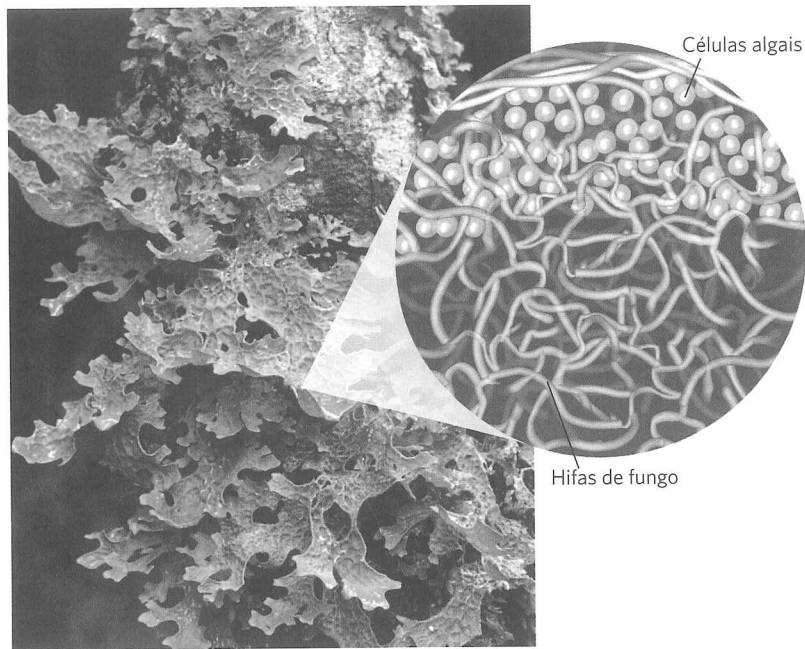
**Consumidor** Organismo que obtém sua energia a partir de outros organismos. Também conhecido como **heterótrofo**.

**Mixótrofo** Organismo que obtém sua energia a partir de mais de uma fonte.

**Predador** Organismo que mata e consome parcial ou totalmente outro indivíduo.

**Parasitoide** Organismo que vive dentro e consome os tecidos de um hospedeiro vivo, e acaba por matá-lo.





**Figura 1.13 Mutualismo.** Um líquen é uma associação simbiótica de um fungo e células algais. (Fotografia de DUNCAN MCEWAN/naturepl.com.)

que consomem o indivíduo hospedeiro por dentro, acabando por matá-lo. A maioria das espécies parasitoides é constituída de vespas e moscas.

#### Parasitismo

Os **parasitas** são organismos que vivem dentro ou sobre outro organismo, chamado de *hospedeiro*. Um parasita individual raramente mata seu hospedeiro, embora alguns hospedeiros morram quando são infectados por um grande número de parasitas. Os parasitas comuns incluem vermes e carrapatos. Quando um parasita causa uma doença, é chamado de **patógeno**. Os patógenos incluem várias espécies de bactérias, vírus, fungos, protistas, e um grupo de vermes chamado *helminto*.

#### Herbivoria

Os **herbívoros** são organismos que consomem produtores, como as plantas e as algas. Quando um herbívoro consome uma planta, ele geralmente consome apenas uma pequena porção da planta, e não a mata. Por exemplo, as lagartas consomem algumas folhas ou partes de folhas, de modo que a planta possa se regenerar. O gado consome os topos das folhas das gramíneas, mas não destroem a região de crescimento, localizada na base da planta.

#### Competição

A **competição** pode ser definida como uma interação com efeitos negativos entre duas espécies que dependem do mesmo recurso limitante para sobreviver, crescer e se reproduzir. Por exemplo, duas espécies de gramíneas poderiam competir pelo nitrogênio no solo. Como resultado, a sobrevivência, o crescimento e a reprodução de cada uma reduzem quando há convívio com as outras espécies de gra-

míneas na mesma área, o que não ocorre quando vivem sozinhas. Da mesma maneira, os coiotes e os lobos poderiam competir pelas mesmas presas na floresta, de tal modo que eles sobrevivem, crescem e se reproduzem melhor quando estão vivendo sozinhos, e não quando a outra espécie está presente. A competição por recursos limitados é uma interação muito comum na natureza.

#### Mutualismo

Quando duas espécies interagem de modo que cada uma receba benefícios da outra, sua interação é um **mutualismo**. Os líquens na **Figura 1.13**, por exemplo, são constituídos de um fungo que vive em conjunto com as células de algas verdes ou cianobactérias como um único organismo. O fungo fornece nutrientes para as algas, e estas fornecem carboidratos da fotossíntese para o fungo. Outros exemplos de mutualismo incluem as bactérias que ajudam a digerir material vegetal nos intestinos do gado, fungos que ajudam as plantas a extrair nutrientes minerais do solo em troca da energia dos carboidratos da planta, e as abelhas que polinizam as flores conforme obtêm o néctar.

---

**Parasita** Organismo que vive dentro ou sobre outro organismo, mas raramente o mata.

---

**Patógeno** Parasita que causa doença em seu hospedeiro.

---

**Herbívoro** Organismo que consome produtores, como plantas e algas.

---

**Competição** Interação com efeitos negativos entre duas espécies que dependem do mesmo recurso limitante para sobreviver, crescer e se reproduzir.

---

**Mutualismo** Interação entre duas espécies em que cada uma recebe benefícios da outra.

### Comensalismo

O **comensalismo** é uma interação na qual duas espécies vivem em estreita associação, e uma espécie recebe um benefício enquanto a outra não tem benefício e nem custo. Por exemplo, plantas como a bardana (*Arctium lappa*) produzem frutos que contêm minúsculas farpas que aderem aos pelos dos mamíferos que encostam nela. A bardana tem o benefício de ter suas sementes dispersadas, enquanto o mamífero não é beneficiado nem prejudicado por transportar esses frutos.

Como os organismos são especializados em formas particulares de vida, muitos tipos diferentes são capazes de viver juntos em estreita associação. Um relacionamento físico próximo entre dois tipos diferentes de organismos é denominado **relação simbiótica**. Muitos organismos parasitas, parasitoides, mutualistas e comensais vivem em relações simbióticas.

Ao considerar os diferentes tipos de interações entre as espécies, pode ser útil classificar as interações entre os dois participantes como positiva (+), negativa (−) ou neutra (0). A Tabela 1.1 apresenta um resumo das interações entre espécies usando essa abordagem.

### Consumidores de matéria orgânica morta

Os consumidores de matéria orgânica morta (incluindo *necrófagos*, *detritívoros* e *decompositores*) também desempenham papéis importantes na natureza. Os **necrófagos**, como os abutres, consomem animais mortos. Os **detritívoros**, como os escaravelhos e muitas espécies de centopeias, decompõem a matéria orgânica morta e os rejeitos (conhecidos como *detritos*) em partículas menores. Os **decompositores**, como muitas espécies de cogumelos, decompõem a matéria orgânica morta em elementos e compostos mais simples que podem ser reciclados pelo ecossistema.

### HABITAT VERSUS NICHOS

Ao caminhar através de uma pradaria no leste ou na região central dos EUA, você provavelmente se depararia com o coelho-cauda-de-algodão (*Sylvilagus floridanus*). Esta espécie prospera em campos agrícolas abandonados, cheios de gramíneas e outras flores silvestres altas intercaladas com arbustos. Essas plantas fornecem alimento para o coelho e

proteção contra muitos de seus predadores, incluindo coiotes (*Canis latrans*) e várias espécies de falcão. Ao considerar as espécies na natureza, os ecólogos consideram útil distinguir entre onde um organismo vive e o que ele faz.

O **habitat** de um organismo é o lugar, ou ambiente físico, em que vive. No caso do coelho, o *habitat* consiste em campos antigos que contêm gramíneas, flores silvestres e arbustos. Os *habitats* são distinguidos por características físicas, incluindo frequentemente a forma predominante de vida vegetal ou animal. Assim, falamos de *habitats* florestais, *habitats* desérticos, *habitats* de um córrego e *habitats* de lagos (Figura 1.14).

Durante os primeiros anos da pesquisa ecológica, os cientistas desenvolveram um complexo sistema de classificação de *habitats*. Por exemplo, eles começaram por distinguir entre *habitats* terrestres e aquáticos. Dentre os *habitats* aquáticos, identificaram os *habitats* de água doce e os marinhos; nos *habitats* marinhos, descobriram *habitats* costeiros, de oceano aberto e do assoalho do oceano. À medida que as classificações se tornaram mais detalhadas, as distinções começaram a ruir, uma vez que os cientistas descobriram que tipos de *habitats* se sobrepõem e que as distinções absolutas raramente existem. No entanto, a ideia de *habitat* não deixa de ser útil, visto que ressalta a variedade de condições às quais os organismos são expostos. Por exemplo, os habitantes de profundezas extremas do oceano e dosséis de florestas tropicais experimentam tanto as condições diferentes de luz, pressão, temperatura, concentração de oxigênio, umidade e concentração de sal, quanto diferenças nos recursos alimentares e nos predadores.

O **nicho** de um organismo inclui a gama de condições bióticas e abióticas que ele pode tolerar. No caso do coelho-cauda-de-algodão, seu nicho inclui os intervalos de temperatura e umidade que ele pode tolerar, as plantas que come e os predadores, coiotes e falcões com os quais convive. Um princípio ecológico importante afirma que cada espécie tem um nicho distinto. Não há duas espécies com exatamente o mesmo nicho, porque cada uma dispõe de atributos distintos

Tabela 1.1 Resultado da interação entre duas espécies.

TIPO DE INTERAÇÃO	ESPÉCIE 1	ESPÉCIE 2
Predação/Parasitoidismo	+	−
Parasitismo	+	−
Herbivoria	+	−
Competição	−	−
Mutualismo	+	+
Comensalismo	+	0

Interações que proporcionam um benefício para uma espécie são indicadas com o símbolo "+", as interações que causam dano a uma espécie são indicadas com o símbolo "−", e interações que não têm efeito em uma espécie são indicadas pelo símbolo "0".

**Comensalismo** Interação na qual duas espécies vivem em estreita associação; uma espécie recebe um benefício enquanto a outra não tem benefício nem custo.

**Relação simbiótica** Quando dois tipos diferentes de organismos vivem em um relacionamento físico próximo.

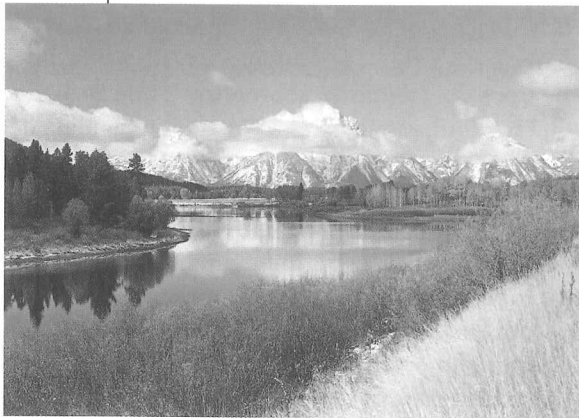
**Necrófago** Organismo que consome animais mortos.

**Detritívoro** Organismo que se alimenta de matéria orgânica morta e rejeitos conhecidos como detritos.

**Decompositores** Organismos que decompõem a matéria orgânica morta em elementos e compostos mais simples que podem ser reciclados pelo ecossistema.

**Habitat** O lugar ou ambiente físico no qual um organismo vive.

**Nicho** A gama de condições bióticas e abióticas que um organismo pode tolerar.



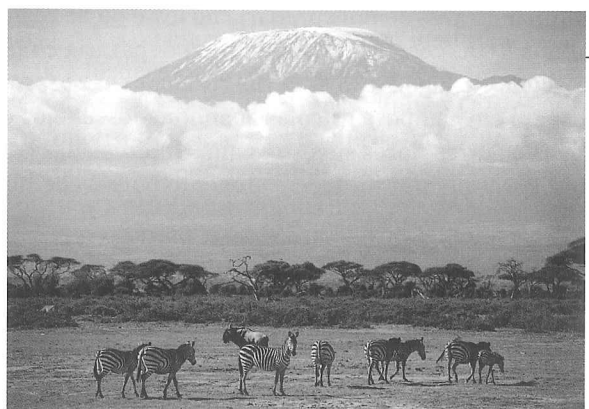
**A.** Remanso em uma curva do Rio Snake, Parque Nacional Grand Teton, Wyoming.



**C.** Parque Nacional dos Vulcões, Ruanda.



**B.** Lago Tenaya, Parque Nacional Yosemite, Califórnia.



**D.** Parque Nacional Amboseli, Quênia.

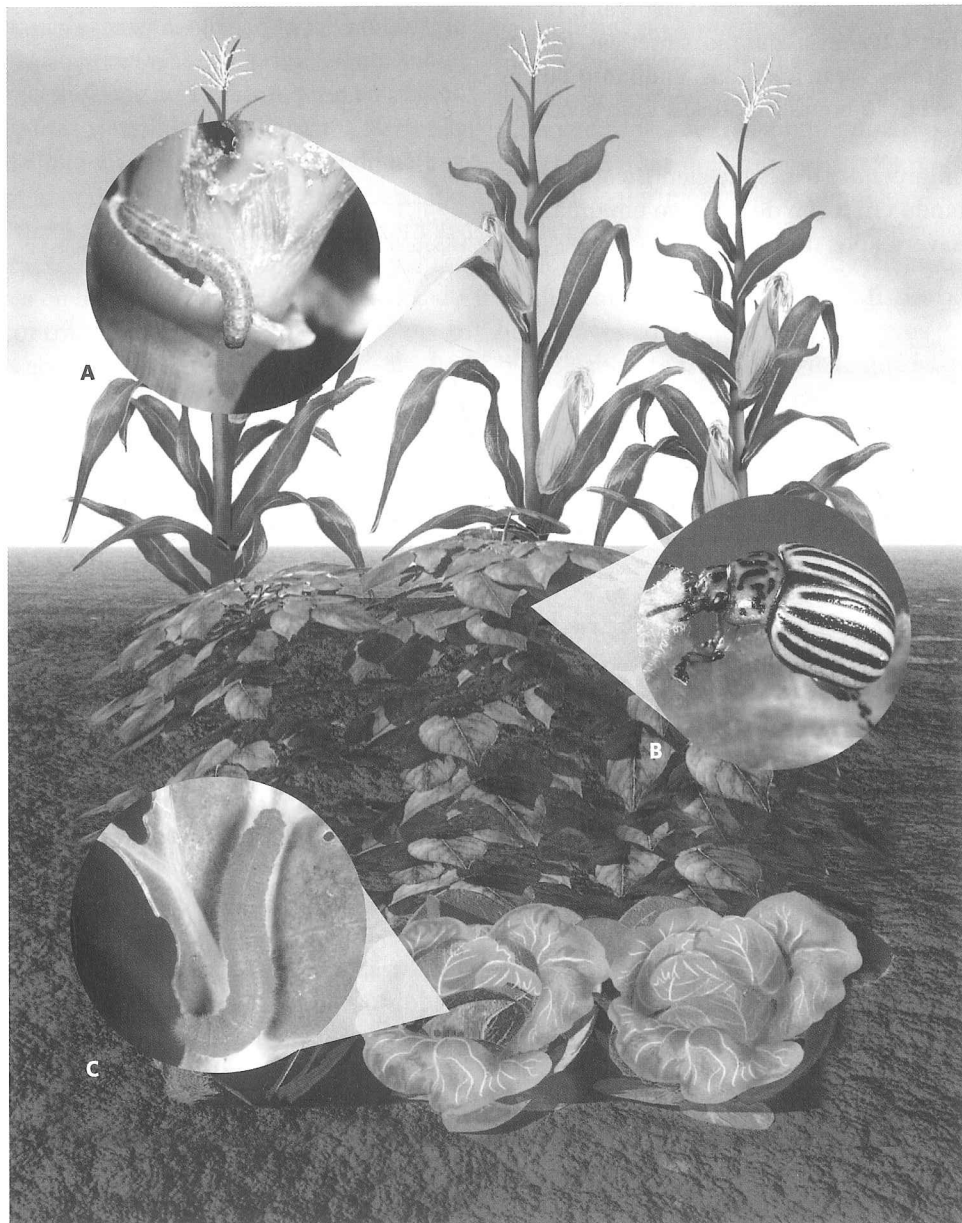
**Figura 1.14 Habitats.** Os *habitats* terrestres são distinguidos pela sua vegetação dominante; enquanto *habitats* aquáticos são distinguidos pela sua profundidade e existência ou não de água corrente. **A.** Correntes de água doce contêm água em movimento. **B.** Os lagos costumam ser grandes corpos de água que têm muito pouco fluxo. **C.** Na floresta tropical, temperaturas amenas e chuvas abundantes sustentam a maior produtividade e biodiversidade na Terra. **D.** Campos tropicais, que se desenvolvem onde a precipitação é escassa, no entanto, sustentam vastos rebanhos de herbívoros pastadores durante a produtiva estação chuvosa. (Fotografias de (A) George Sanker/naturepl.com; (B) McPHOTO/age fotostock; (C) Anup Shah/naturepl.com; e (D) Staffan Widstrand/naturepl.com.)

da forma e função que determinam as condições que podem tolerar, como se alimentam e como escapam dos inimigos. Considere as centenas de espécies de insetos que podem viver em um jardim; cada uma tem um nicho único em termos de alimentos que come (Figura 1.15). Por exemplo, a lagarta da borboleta branca do repolho (*Pieris rapae*) alimenta-se do grupo de plantas que foram cultivadas a partir da planta da mostarda-selvagem (*Brassica oleracea*), incluindo repolho, brócolis e couve-flor. No entanto, o besouro-da-batata-do-Colorado (*Leptinotarsa decemlineata*) se alimenta quase exclusivamente das folhas da planta da batata (*Solanum tuberosum*).

Da mesma maneira, a broca-do-milho-europeia (*Ostrinia nubilalis*) alimenta-se principalmente em plantas de milho (*Zea mays*). A variedade de *habitats* e nichos detém a chave para a maior parte da diversidade dos organismos vivos.

### Os cientistas usam várias abordagens para estudar a ecologia

Os cientistas têm investigado os diversos papéis que os organismos desempenham no ambiente por mais de um século. Os ecólogos investigam esse assunto por meio de um processo



**Figura 1.15 Nicho.** Mesmo em um grupo de organismos similares, tais como os insetos, cada espécie tem um nicho distinto. No caso dos insetos, os alimentos que consomem são apenas um aspecto do seu nicho. **A.** A broca-do-milho-europeia é especializada para se alimentar das plantas do milho. **B.** O besouro-da-batata-do-Colorado é especializado para se alimentar das folhas das plantas da batata. **C.** A lagarta da borboleta-branca-do-repolho é especializada para se alimentar das folhas de repolho, brócolis e couve-flor. (Fotografias de (A) Scott Sinkler/ano fotostock; (B) blickwinkel/Alamy; e (C) Nigel Cattlin/Alamy.)

sistemático, geralmente denominado método científico. Os três passos desse processo, o qual é mostrado na Figura 1.16, são (1) observações em relação a um padrão na natureza, (2) desenvolvimento de uma hipótese, e (3) teste da hipótese.

### OBSERVAÇÕES, HIPÓTESES E PREVISÕES

A maioria das pesquisas começa com um conjunto de observações sobre a natureza, convidando a uma explicação. Em geral, essas observações identificam e descrevem um padrão consistente. Como aprendemos na história da pesquisa sobre as chaminés hidrotérmicas, uma vez que se descobriu que a diversidade e a abundância de espécies que vivem em torno delas não poderiam ser sustentadas pela pequena quantidade relativa de matéria orgânica proveniente da superfície ensolarada, foi necessário desenvolver e testar novas hipóteses sobre as bactérias quimiossintéticas. Nesses casos, algumas hipóteses serão apoiadas, enquanto outras serão rejeitadas e exigirão novas hipóteses. Esse processo é o método científico.

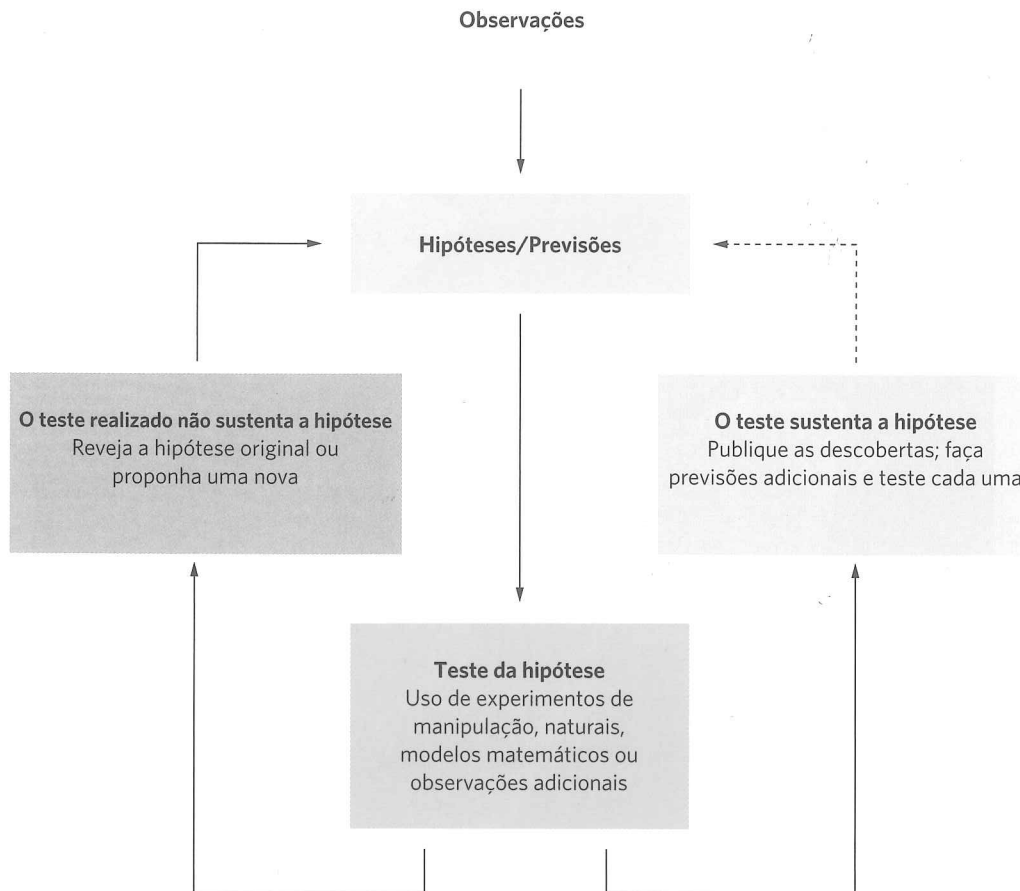
Para ajudar a compreender o método científico, imagine que você está andando em torno de um lago em uma noite quente de primavera após uma tempestade; você pro-

vavelmente ouviria sapos machos vocalizando chamados. Se você voltasse ao mesmo lago em noites frias após um período de seca, seria menos provável ouvir sapos coaxando. Se você viajasse para muitos lagos diferentes, observaria este padrão repetidamente; ou seja, você observaria e descreveria um padrão consistente na natureza. Padrões naturais repetidos levam os cientistas a teorizar sobre as causas desses padrões.

Publique as descobertas; faça previsões adicionais e teste cada uma

As **hipóteses** são ideias que potencialmente explicam uma observação repetida. No caso dos sapos, tem sido observado de modo consistente que eles chamam apenas nas noites quentes após uma tempestade. Após estabelecer a existência desse padrão, é necessário entendê-lo melhor. Poderíamos querer explicar *como* os sapos sentem as mudanças na temperatura e na precipitação, e como a percepção dessas mudanças ambientais estimula os sapos a coaxar. Também poderíamos querer explicar *por que* os sapos

**Hipótese** Uma ideia que potencialmente explica uma observação repetida.



**Figura 1.16 Método científico.** O método científico começa com a observação dos padrões na natureza e desenvolvimento de uma hipótese que explica como ou por que o padrão existe. As previsões de uma hipótese são testadas com experimentos de manipulação, experimentos naturais, modelos matemáticos ou observações adicionais.

chamam em noites quentes após a chuva. Como os sapos se beneficiam do chamado (talvez atraindo parceiros) e quais, se existentes, são os custos da vocalização?

As hipóteses sobre como e por que os organismos respondem ao ambiente representam diferentes tipos de explicações. A explicação do “como” objetiva os detalhes da percepção sensorial do animal e as alterações em suas concentrações hormonais, sistema nervoso e sistema muscular. No caso dos sapos, poderíamos supor que seu sistema nervoso detecta temperaturas amenas e chuva. Isso inicia mudanças nos hormônios e fisiologia de um sapo macho, o que o faz contrair os músculos que o fazem vocalizar.

As hipóteses que abordam as mudanças imediatas nos hormônios, fisiologia, sistema nervoso ou sistema muscular de um organismo são conhecidas como **hipóteses próximas**. Se essas hipóteses estiverem corretas, então será possível fazer *previsões*. As **previsões** são afirmações que surgem logicamente das hipóteses. Por exemplo, se estiver correta a nossa hipótese de como uma noite chuvosa faz os sapos machos chamar, então podemos prever que qualquer sapo exposto a temperaturas amenas e a chuva responderá alterando a concentração de hormônios específicos que estimulam o cérebro a enviar um sinal para os músculos do aparelho vocal se contrair.

**Hipóteses finais** abordam o motivo de um organismo responder de determinada maneira ao seu ambiente; ou seja, os custos em termos de aptidão e os benefícios de uma resposta específica. Por exemplo, poderíamos estabelecer a hipótese de que os sapos machos coaxam para atrair as fêmeas. Além disso, se houver suspeita de que os sapos machos coaxam para atrair as fêmeas, então talvez os machos coaxem em noites quentes após uma tempestade porque nesse período produzem as melhores condições para a postura dos ovos, que é quando as fêmeas estão mais interessadas em acasalamento. Os machos se beneficiam vocalizando em uma noite quente e úmida, porque terão maior probabilidade de atrair as fêmeas e, portanto, gerar mais filhotes. Se os machos chamarem em outro momento, atrairão menos fêmeas e terão um benefício muito menor. Em relação aos custos, poderíamos estabelecer a hipótese de que, quando os sapos machos chamam para atrair as fêmeas, eles correm o risco de atrair também a atenção de predadores. O risco aumentado de morte representa um alto custo de aptidão para sapos do sexo masculino.

Agora dispomos de diversas previsões como consequência lógica da nossa hipótese final sobre o chamado dos sapos machos: (1) os machos que coaxam atrairão as fêmeas; (2) as fêmeas procuram ativamente por machos apenas em noites quentes e úmidas; (3) se cantar impõe um custo, os machos devem restringir o seu canto para os momentos que proporcionarão o benefício máximo.

## COMO TESTAR HIPÓTESES COM EXPERIMENTOS DE MANIPULAÇÃO

Uma hipótese específica raramente consegue ser confirmada. No entanto, nossa confiança aumenta à medida que continuamos a testar uma hipótese e repetidamente des-

cobrimos que nossas observações a sustentam. Embora os métodos para adquirir conhecimento científico pareçam ser diretos, existem muitas armadilhas. Por exemplo, uma relação observada entre dois fatores não significa necessariamente que um fator faz com que o outro mude. A causa deve ser determinada de maneira independente. Para alcançar este objetivo, podemos projetar **experimentos de manipulação**, nos quais uma hipótese é testada alterando-se um fator da hipótese que representa uma causa subjacente do fenômeno.

Para compreender o processo de um experimento de manipulação, considere a observação de que os insetos herbívoros frequentemente consomem menos que 10% dos tecidos de uma planta. Os ecólogos propuseram várias hipóteses para explicar isso. Uma delas é que os predadores consomem insetos herbívoros em uma taxa tão alta que as populações de insetos permanecem baixas. Essa população baixa de insetos não consegue consumir muitos dos tecidos das plantas. Essa parece ser uma hipótese razoável, mas como testá-la sem um experimento de manipulação?

Os pesquisadores que trabalham na questão decidiram explorar se a hipótese de predação se aplica a insetos que se alimentam de carvalhos no Missouri. Eles observaram que as aves consomem muitos insetos em folhas de carvalho e elaboraram a hipótese de que as aves reduziram as populações de insetos herbívoros. Se essa hipótese fosse correta, quando as aves estivessem ausentes, as populações de insetos aumentariam e consumiriam mais biomassa foliar. A confirmação dessa previsão apoiaria sua hipótese; a falta de confirmação levaria a rejeitar a hipótese e a propor uma nova.

Para testar a hipótese de que a predação por aves reduz a abundância de insetos em árvores de carvalho, os pesquisadores decidiram realizar um experimento de manipulação em que eles usaram gaiolas que isolavam as aves das árvores (Figura 1.17A). A **manipulação**, também conhecida como **tratamento**, é o fator que se quer variar em um experimento. Em geral, uma das manipulações usadas é um **controle**. Um **controle** é uma manipulação que inclui todos os aspectos de um experimento, exceto o fator de interesse.

---

**Hipótese próxima** Hipótese que aborda as mudanças imediatas nos hormônios, fisiologia, sistema nervoso, ou do sistema muscular de um organismo.

---

**Previsão** A consequência lógica de uma hipótese.

---

**Hipótese final** Hipótese que explica por que um organismo responde de determinada maneira ao seu ambiente — ou seja, os custos em termos de aptidão e os benefícios de uma resposta específica.

---

**Experimento de manipulação** Processo pelo qual uma hipótese é testada alterando-se um fator que represente uma causa subjacente do fenômeno.

---

**Manipulação** Fator que queremos variar em um experimento; também conhecido como **Tratamento**.

---

**Controle** Manipulação que inclui todos os aspectos de um experimento, exceto o fator de interesse.

No experimento de carvalho, as árvores isoladas serviram como o tratamento enquanto as árvores sem isolamento serviram de controle.

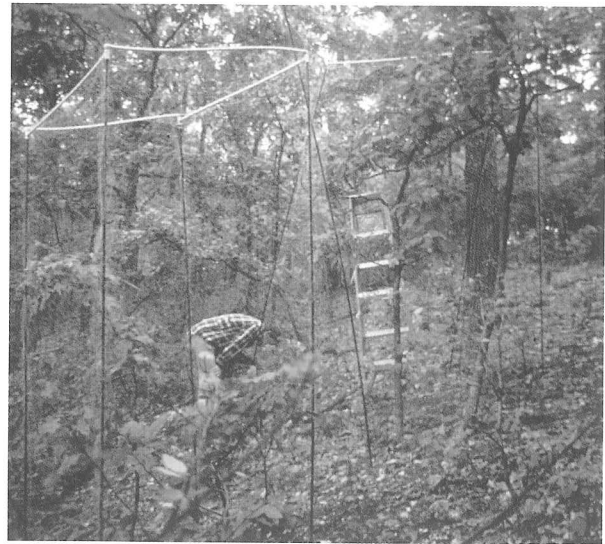
Assim que decidimos sobre quais manipulações queremos fazer, é necessário atribuir a cada manipulação uma **unidade experimental** específica; tal unidade é o objeto ao qual aplicamos a manipulação. No caso do experimento do carvalho, os pesquisadores decidiram que usariam grupos de três mudas de carvalho branco como suas unidades experimentais. Depois de tomar essa decisão, cada unidade experimental foi isolada (com redes que envolviam cada grupo de três mudas, tornando-as inacessíveis às aves) ou deixada sem isolamento para permitir o acesso das aves.

A manipulação de uma única unidade experimental pode fornecer resultados interessantes, mas estes podem não ser confiáveis a menos que o experimento seja repetido e demonstre um resultado similar. Ser capaz de produzir um resultado semelhante múltiplas vezes é conhecido como **replicação**, o que é uma característica essencial da maioria dos estudos experimentais. No estudo dos carvalhos, os investigadores decidiram acrescentar gaiolas para 10 grupos de árvores e deixar 10 grupos de árvores sem isolamento. Ao fazer isso, eles replicaram o experimento 10 vezes.

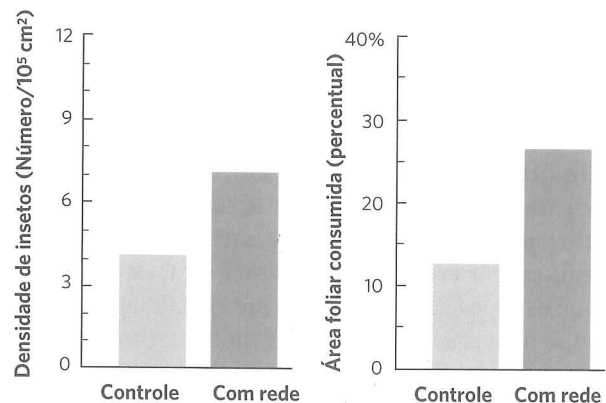
Quando associamos manipulações diferentes para nossas unidades experimentais, isso deve ser feito usando a **randomização**, o que significa que cada unidade experimental tem uma possibilidade igual de ser associada a uma determinada manipulação. No experimento de carvalho, os pesquisadores designaram aleatoriamente grupos de árvores a ser isolados ou não como controles. Dessa maneira, eles puderam ter a certeza de que as árvores isoladas inicialmente não eram diferentes das árvores controle.

Uma vez que os pesquisadores montaram o experimento, eles coletaram dados sobre o número de insetos herbívoros e a porcentagem de tecido foliar que tinha sido consumido. Eles descobriram que as árvores isoladas tinham em torno de duas vezes mais insetos herbívoros que as árvores de controle. Além disso, a porcentagem de tecido foliar consumido no final da estação de crescimento foi quase duas vezes mais elevada em árvores isoladas que nas árvores controle (Figura 1.17B). Esses achados levaram os pesquisadores a concluir que o experimento apoiava sua hipótese.

Embora muitos experimentos sejam conduzidos em ambientes naturais, como as florestas de carvalho ou lagos, outros são conduzidos em escalas menores (Figura 1.18). Muitos experimentos fazem uso de **microcosmos**, que são sistemas ecológicos simplificados que tentam replicar as características essenciais de um sistema ecológico em uma montagem de laboratório ou de campo. No caso dos experimentos que estudam sistemas aquáticos, por exemplo, os microcosmos podem consistir em grandes tanques de água ao ar livre. Tais tanques apresentariam muitas das características dos corpos de água naturais, incluindo solo, vegetação e uma diversidade de organismos (Figura 1.18B). O uso de microcosmos assume que uma resposta às manipulações



A



B

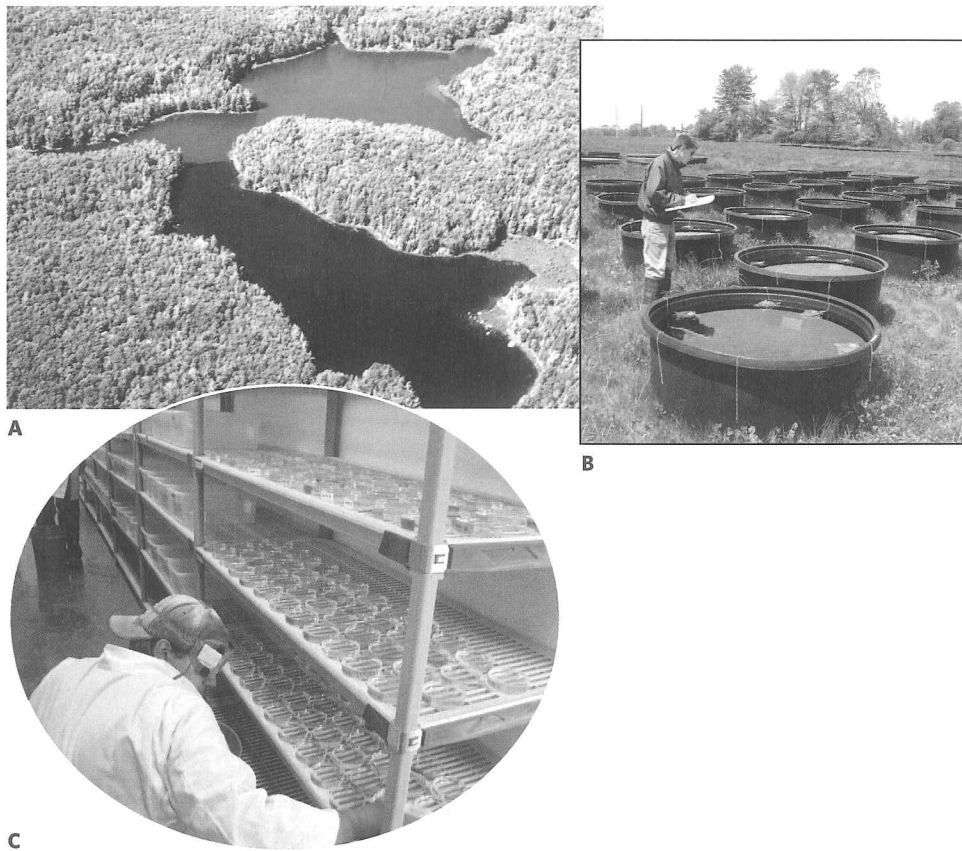
**Figura 1.17 Experimento de manipulação.** Experimentos de manipulação fornecem os testes de hipóteses mais fortes. **A.** Em um estudo que testou se as aves são um fator importante na determinação do número de insetos nas árvores de carvalho no Missouri, os ecólogos colocaram redes em torno de algumas mudas de carvalho branco para excluir as aves, e deixaram outras mudas de carvalho sem isolamento para servir como um controle. **B.** A partir desse experimento, os investigadores mediram o número de insetos herbívoros por folha e a quantidade de tecido foliar que foi consumido em cada um dos dois tratamentos. (Segundo Marquis RJ, Whelan CJ. Insectivorous birds increase growth of white oak through consumption of leaf-chewing insects, *Ecology* 75 (1994): 2007-2014. Fotografia de Chris Whelan, da Universidade de Illinois.)

**Unidade experimental** Objeto ao qual aplicamos uma manipulação experimental.

**Replicação** Capacidade de produzir um resultado semelhante várias vezes.

**Randomização** Aspecto do projeto do experimento em que cada unidade experimental tem uma possibilidade igual de ser associada a uma determinada manipulação.

**Microcosmo** Sistema ecológico simplificado que tenta replicar as características essenciais deste tipo de sistema em uma montagem de laboratório ou de campo.



**Figura 1.18 Vias experimentais.** A escolha da via experimental geralmente representa um compromisso entre a complexidade das condições naturais e as condições altamente controladas de um experimento de laboratório. **A.** Experimentos de manipulação de lagos inteiros, como este em Wisconsin, incluem condições naturais, mas esses experimentos são difíceis de replicar. **B.** Os experimentos de microcosmos, como esta do Laboratório de Ecologia *Pymatuning* da Universidade de Pittsburgh, incluem muitas características de um lago por conter comunidades de organismos aquáticos. O uso de microcosmos possibilita que as manipulações possam ser reproduzidas muitas vezes. **C.** Os experimentos de laboratório, como esta de pesticida realizada em placas de Petri, possibilitam aos pesquisadores realizar experimentos altamente controlados, mas eles são conduzidos sob condições muito artificiais. (Fotografias de cortesia (A) de Carl Watras; (B) e (C) de Rick Relyea.)

em um microcosmo representa as reações que ocorreriam em um *habitat* natural. Por exemplo, poderíamos querer entender como espécies de peixes competem por comida. Observar a competição entre as espécies de peixes em um lago sombrio pode não ser viável, mas um grande tanque de água, que inclua muitas características do lago, poderia funcionar bem, desde que os peixes se comportem de modo semelhante em ambas as condições. Se assim for, os resultados do experimento de microcosmos podem produzir reações que podem ser generalizadas para o sistema natural mais amplo.

#### ABORDAGENS ALTERNATIVAS PARA EXPERIMENTOS DE MANIPULAÇÃO

Muitas hipóteses não podem ser testadas por experimentos, seja pelo fato de a quantidade de área ou escala de tempo necessária para testar a hipótese ser simplesmente muito grande, ou por não ser possível isolar variáveis específicas e conceber um controle adequado. Essas limitações são comuns quando estamos tentando entender os padrões que

ocorreram durante longos períodos de tempo, ou em sistemas como populações ou ecossistemas inteiros, que são grandes demais para serem manipulados.

Várias hipóteses diferentes poderiam explicar igualmente bem uma determinada observação, de modo que os investigadores deveriam fazer previsões que distinguíssem as diferentes alternativas. Por exemplo, muitos ecólogos observaram diminuição no número de espécies à medida que nos movemos para o norte ou para o sul, afastando-nos do equador. Esse padrão repetido tem muitas explicações potenciais. Quando se viaja para o norte a partir do equador, temperatura e precipitação médias diminuem, incidência de luz solar diminui e sazonalidade aumenta. Cada um desses fatores, isoladamente ou em conjunto, poderia afetar o número de espécies que podem coexistir em uma localidade específica. Com efeito, dúzias de hipóteses têm sido propostas para explicar a redução observada no número de espécies à medida que nos afastamos do equador. Isolar o efeito de cada fator revelou-se difícil, porque todos os outros fatores para os quais podemos construir uma hipótese mudam em conjunto.



## Por que calculamos médias e variâncias?

Como vimos no experimento dos carvalhos, ao testar hipóteses, ecólogos fazem **observações** que podem ser consideradas como informação, incluindo as medidas que são obtidas dos organismos ou do ambiente. Essas observações, também conhecidas como **dados**, são então utilizadas para testar hipóteses. No caso das árvores de carvalho, os investigadores recolheram dados sobre a densidade de insetos herbívoros e a quantidade de tecido foliar que foi consumido por eles.

Ao fazer perguntas em ecologia, geralmente queremos conhecer o valor médio (ou a *média*) dos dados coletados a partir de diferentes tratamentos ou obtidos em condições distintas. No caso do experimento dos carvalhos, os pesquisadores queriam comparar a densidade média de insetos em árvores isoladas contra árvores sem cobertura, a fim de determinar se as aves reduzem o número de insetos que consomem suas folhas.

Embora a comparação dos diferentes meios nos direcione para as tendências centrais dos dados, os ecólogos geralmente querem saber se os dados utilizados para produzir a média têm variabilidade alta ou baixa. Por exemplo, se a densidade média de insetos nas folhas foi de 10 insetos por metro quadrado de superfície foliar em ambos os conjuntos seguintes de dados, qual é o grupo mais variável?

Grupo A: 10, 9, 11, 10, 8, 12, 9, 11, 8, 12

Grupo B: 10, 5, 15, 10, 6, 14, 5, 15, 7, 13

Embora ambos os grupos tenham a mesma média, as observações do Grupo A variam de 8 a 12; enquanto, no Grupo B, variam de 5 a 15. Por conseguinte, os dados do Grupo B são mais variáveis.

Por que a preocupação com a variabilidade dos dados que recolhemos? Tendo em conta que cada média é calculada a partir de um conjunto de dados encontrado em um

Os ecólogos têm várias abordagens alternativas que superaram essas dificuldades. Uma opção, o **experimento natural**, baseia-se na variação natural no ambiente para testar uma hipótese. Por exemplo, considere a hipótese de que o número de espécies em uma ilha é influenciado pelo tamanho da ilha, visto que ilhas maiores têm mais nichos disponíveis, suportam populações maiores que resistem à extinção e são mais fáceis para que os organismos encontrem e colonizem. Um experimento de manipulação para testar essa hipótese seria impossível, pois exigiria tanto uma manipulação maciça de muitas ilhas como a capacidade de observar a

intervalo estreito ou amplo, a variabilidade nos dá uma ideia de quanto as distribuições de dados se sobrepõem entre si. Se dois grupos de dados apresentam diferentes médias, mas as distribuições de dados se sobrepõem muito, então não podemos ter certeza de que os dois grupos são realmente diferentes uns dos outros. Por outro lado, se dois grupos de dados têm diferentes médias, mas as distribuições de dados não se sobrepõem, então podemos ficar confiantes de que os dois grupos são diferentes.

Uma maneira de medir o quão amplamente os valores dos dados estão dispersos em torno da média é calcular a *variância da média*. A **variância da média** é uma medida que indica a dispersão de dados em torno da média de uma população em que cada membro da população foi mensurado. Os valores mais amplamente dispersados pela média apresentarão maior variância.

A maneira mais fácil de calcular a variância em um conjunto de dados (designados por  $\sigma^2$ ) é fazê-la em duas etapas:

1. Elevar ao quadrado cada valor observado (denotado como  $\chi$ ) e calcular a média desses valores ao quadrado (em que E indica que estamos usando a média de diversos valores):

$$E[\chi^2]$$

2. A partir dessa média, subtraia o quadrado do valor da média observado:

$$\sigma^2 = E[\chi^2] - [E(\chi)]^2$$

Em outras palavras,  $E[\chi^2]$  é a média dos valores observados ao quadrado e  $[E(\chi)]^2$  é o quadrado do valor médio observado.

**Observações** Informações, incluindo as medidas, que são obtidas dos organismos ou do ambiente; também conhecidas como **Dados**.

**Variância da média** Uma medida que indica a dispersão de dados em torno da média de uma população, em que cada membro da população foi mensurado.

diferença no número de espécies colonizadoras ao longo de centenas ou até mesmo milhares de anos. Em vez disso, podemos “testar” a hipótese comparando o número de espécies que vivem em ilhas de diferentes tamanhos, criadas em períodos mais curtos devido a mudanças no nível do mar ou de um lago. Embora um experimento de manipulação não seja possível nesses casos, um experimento natural como o sugerido ainda torna possível que os pesquisadores

**Experimento natural** Uma abordagem para testar uma hipótese que se baseia na variação natural no ambiente.

Ao calcular a variância da média, o cálculo baseia-se na suposição que medimos cada membro de uma população. Na realidade, muitas vezes não se pode medir cada membro; no entanto, em vez disso, mensura-se uma amostra da população. No estudo do carvalho, por exemplo, os pesquisadores não mediram os insetos em todas as árvores de carvalho, mas usaram uma amostra de 10 grupos de árvores. Quando medimos uma amostra da população, a variação nos dados é chamada de **variância da amostra**, a qual é muito semelhante à variância da média, exceto que agora contamos como medimos muitas amostras da população (denotadas como  $n$ ). A variância da amostra (denotada como  $s^2$ ) é calculada como:

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \times \sigma^2$$

ou

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \times (E[X^2] - [E(X)]^2)$$

Nesta equação, é possível observar que, à medida que o número de amostras torna-se muito grande, o valor da variância da amostra se aproxima do valor da variância da média para a população inteira.

Para ajudar a entender como calcular a variância da amostra, considere o seguinte conjunto de observações sobre a abundância de insetos por folha de árvores cobertas com redes ou não:

Árvores cobertas	Árvores descobertas
8	4
6	3
7	2
9	4
5	2

determinem se os padrões da natureza são consistentes ou inconsistentes com hipóteses sobre as causas subjacentes.

Os ecólogos também usam *modelos matemáticos* para explorar o comportamento dos sistemas ecológicos. Em um **modelo matemático**, um investigador cria uma representação de um sistema com um conjunto de equações que corresponde às relações hipotéticas entre cada um dos componentes do sistema. Por exemplo, podemos usar um modelo matemático para representar como os nascimentos e a imigração contribuem para a taxa de crescimento de uma população, e como as mortes e a emigração reduzem a taxa de

Para as árvores isoladas, é possível calcular a média dos valores como:

$$(8 + 6 + 7 + 9 + 5) \div 5 = 7$$

E a média dos valores ao quadrado como:

$$(8^2 + 6^2 + 7^2 + 9^2 + 5^2) \div 5 = 51$$

Podemos então calcular a variância da amostra para os dados das árvores isoladas como:

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \times (E[X^2] - [E(X)]^2)$$

$$s^2 = \frac{5}{5-1} \times (51 - (7)^2)$$

$$s^2 = (1,25) \times (51 - 49) = 2,5$$

**EXERCÍCIO** Usando os dados das cinco repetições de árvores descobertas, calcule a média e a variância da amostra de abundância de insetos.

**Variância da amostra** Uma medida que indica a dispersão dos dados em torno da média de uma população, quando apenas uma amostra da população foi medida.

crescimento. Neste sentido, um modelo matemático é uma hipótese; ele fornece uma explicação da estrutura e do funcionamento observados do sistema.

É possível testar a precisão de um modelo matemático comparando as previsões que ele fornece com as observações da natureza. Por exemplo, os epidemiologistas têm desenvolvido modelos para descrever a propagação de doen-

**Modelo matemático** Representação de um sistema com um conjunto de equações que correspondem às relações hipotéticas entre os componentes do sistema.

ças transmissíveis. Esses modelos incluem fatores como as proporções de uma população que são suscetíveis, expostas, infectadas e recuperadas de infecções. Os modelos incluem também as taxas de transmissão e a probabilidade de que o organismo causará uma doença no outro infectado. Com a inclusão de todos esses fatores, esses modelos podem fazer previsões sobre a frequência e a gravidade dos surtos de doenças. Essas previsões podem então ser testadas comparando-as com as observações de surtos de doenças do mundo real. Esta abordagem está sendo empregada para diversas doenças importantes da vida selvagem, incluindo a transmissão de raiva em animais como morcegos, guaxinins, gambás e raposas, e a transmissão da Doença de Lyme em populações das vidas selvagem e humana.

Os modelos matemáticos podem ser usados em qualquer escala. Por exemplo, em uma escala maior, os ecólogos criaram modelos matemáticos para investigar a forma como a queima de combustíveis fósseis afeta o teor de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Para gerenciar os impactos humanos sobre o ambiente, é criticamente importante entender essa relação. Os modelos do inventário de carbono global incluem, dentre outros fatores, as equações que descrevem a absorção de CO<sub>2</sub> pelas plantas e a dissolução do CO<sub>2</sub> nos oceanos. As versões anteriores desses modelos falharam em explicar as observações e superestimaram o aumento anual das concentrações do CO<sub>2</sub> na atmosfera. O mundo real evidentemente contém “sumidouro” de CO<sub>2</sub>, como a regeneração das florestas que removem o CO<sub>2</sub> da atmosfera. Ao incluir os efeitos desses sumidouros de CO<sub>2</sub>, os modelos refinados de carbono descrevem com maior precisão dados atmosféricos observados, e têm probabilidade maior de prever as mudanças futuras com exatidão.

Para qualquer modelo, podemos apoiar ou rejeitar a hipótese confrontando as previsões do modelo com as observações. Os modelos rejeitados podem ser refinados ainda mais para incorporar complexidades adicionais e melhor se ajustar às nossas observações.

## Os humanos influenciam os sistemas ecológicos

Por mais de um século, os ecólogos têm trabalhado com muita dedicação para entender como a natureza funciona, desde o nível do organismo até o nível da biosfera. As maravilhas do mundo natural aguçam a nossa curiosidade sobre a vida e nosso ambiente. Para muitos ecólogos, uma curiosidade sobre como a natureza funciona é motivo suficiente para estudar ecologia. Cada vez mais, no entanto, os ecólogos lutam para entender como o rápido crescimento da população humana, já com mais de 7 bilhões de pessoas, está afetando o planeta. Nossa necessidade de compreender a natureza está se tornando cada vez mais urgente, pois o crescimento da população humana sobrecarrega o funcionamento dos sistemas ecológicos. Os ambientes dominados ou criados por humanos (incluindo áreas urbanas e periféricas – campos agrícolas, plantações de árvores e áreas de lazer) são também sistemas ecológicos. O bem-estar da humanidade depende da manutenção do bom funcionamento desses sistemas.

Atualmente, a população humana consome enormes quantidades de energia e recursos, e produz grandes quantidades de rejeitos. Como resultado, praticamente todo o planeta é fortemente influenciado pelas atividades humanas (Figura 1.19). Essas influências incluem a degradação do ambiente natural e a ruptura de muitas funções importantes que os ambientes naturais proporcionam aos humanos. O aumento do consumo de recursos naturais pelos humanos tem causado uma série de problemas ecológicos. Por exemplo, a remoção de plantas de seu ambiente natural para serem usadas como plantas ornamentais, a exploração de animais para consumo humano e o comércio de animais têm causado o declínio de muitas espécies em seus *habitats* nativos. As espécies afetadas são diversas, incluindo os cactos do sudoeste americano, coletados para a venda como plantas ornamentais, várias espécies de répteis e anfíbios, vendidas no comércio de animais, e muitas espécies de peixes e baleias que são sobre-exploradas pela pesca comercial. Como o comércio tornou-se mais global, as espécies têm sido introduzidas involuntariamente em novos locais a uma taxa crescente. Algumas dessas espécies (p. ex., ratos, cobras e patógenos) podem ter efeitos devastadores sobre as espécies locais. Para alimentar 7 bilhões de pessoas, temos convertido uma grande quantidade de terra para uso agrícola. Essa conversão trouxe consigo uma série de desafios, incluindo a perda de *habitats* naturais, poluição por fertilizantes e pesticidas e questões relacionadas com o cultivo de culturas geneticamente modificadas. Algumas culturas, como o milho, agora estão sendo cada vez mais utilizadas como fontes de combustível, também conhecidas como *biocombustíveis*, demandando ainda mais terra para ser convertida para uso agrícola. Os humanos também precisam de terra para habitação, comércio e indústria. Isso tem reduzido ainda mais a quantidade de *habitat* natural disponível para outras espécies, e tem sido um grande contribuidor para o declínio e a extinção de muitas espécies. Ao longo do livro, essas questões serão abordadas mais detalhadamente.

Outro conjunto de desafios ecológicos foi provocado pelos rejeitos produzidos pelas atividades humanas. Por exemplo, esgotos e processos industriais não tratados podem danificar o ar, a água e o solo. Além disso, o uso de usinas nucleares para gerar eletricidade produz quantidades substanciais de rejeitos nucleares. De todos os resíduos humanos, talvez nenhum cause uma preocupação pública maior que os *gases de estufa*, responsáveis pelo aquecimento global. Os **gases de estufa** são compostos existentes na atmosfera que absorvem a energia térmica infravermelha emitida pela Terra e, então, emitem parte da energia de volta para a Terra. Ao fazer isso, os gases impedem que grande parte dessa energia irradiada da superfície da Terra escape para o espaço. Os gases de estufa incluem muitos compostos diferentes, mas um importante é o CO<sub>2</sub>, que é produzido pela queima de

**Gases de estufa** Compostos na atmosfera que absorvem a energia térmica do infravermelho emitida pela Terra e, então, passam a refletir parte desta energia de volta para a Terra.



**Figura 1.19 Impactos humanos sobre os sistemas ecológicos.** O crescimento da população humana, especialmente ao longo dos últimos dois séculos, alterou grande parte do planeta. Os humanos têm destruído *habitats*, convertido terras em agricultura, criado poluição do ar e da água, queimado grandes quantidades de combustíveis fósseis e sobre-explorado plantas e animais.

combustíveis fósseis nos carros que dirigimos e nas usinas geradoras de eletricidade a carvão\* que fornecem energia para muitos de nossos lares e empresas. À medida que a população humana e as demandas por aumento de energia continuam a crescer, queimamos mais combustíveis fósseis e produzimos mais gases de estufa. Quanto mais gases de estufa introduzimos na atmosfera, mais quente torna-se a Terra.

Como os sistemas ecológicos são inerentemente complexos, é difícil prever e gerenciar os efeitos de uma população humana crescente sobre os sistemas ecológicos em todos os níveis. No nível do organismo, podemos querer saber como um pesticida pulverizado no ambiente pode afetar cada um dos muitos tecidos e sistemas orgânicos de um animal, levando a mudanças no comportamento, crescimento e reprodução. No nível da comunidade, podemos perguntar como uma diminuição na abundância de uma espécie cau-

sada pela coleta comercial poderia afetar as populações de outras espécies naquela comunidade. No nível da biosfera, gostaríamos de quantificar o grande número de fontes que emitem CO<sub>2</sub> e compreender os processos que retiram o CO<sub>2</sub> da atmosfera. Cada um desses casos apresenta um conjunto de questões complexas que não são fáceis de responder. No entanto, precisamos de uma sólida compreensão de como o sistema ecológico opera antes que possamos prever o resultado de impactos antropogênicos sobre o sistema e recomendar maneiras de minimizar danos a ele.

#### O PAPEL DOS ECÓLOGOS

A situação das espécies individuais que correm risco de extinção nos afeta emocionalmente. No entanto, cada vez mais, os ecólogos percebem que o único meio eficaz de preservar as espécies do mundo é por meio da conservação dos ecossistemas e da gestão dos processos ecológicos em larga escala. Espécies individuais, incluindo aquelas que os humanos dependem para alimentos e outros produtos, são eles pró-

\*N.R.T.: Ou óleo, ou gás natural, ou queima de qualquer outro combustível fóssil, na verdade. O carvão é citado aqui porque o autor é americano.

prios dependentes da manutenção dos sistemas de suporte ambiental. Os efeitos locais das atividades humanas sobre os sistemas ecológicos muitas vezes podem ser gerenciados, uma vez que entendamos os mecanismos subjacentes responsáveis pela mudança. No entanto, nossas atividades têm levado, cada vez mais, a vários efeitos generalizados, os quais são mais difíceis para os cientistas caracterizarem e os órgãos legislativos e reguladores controlarem. Por essa razão, uma compreensão científica clara dos problemas ambientais é um pré-requisito necessário para a ação.

A mídia está cheia de relatos de problemas ambientais: desaparecimento de florestas tropicais, estoques de peixes deplecionados, doenças emergentes, aquecimento global e guerras que causam tragédias ambientais e sofrimento humano. No entanto, é importante saber que existem histórias de sucesso também. Muitos países têm feito grandes progressos na limpeza de seus rios, lagos e ar. Os peixes estão novamente migrando rio acima da América do Norte e Europa para desovar. A chuva ácida diminuiu, graças às mudanças na queima de combustíveis fósseis. A liberação de clorofluorcarbonos, que danificam a camada de ozônio que protege a superfície da Terra da radiação ultravioleta, diminuiu dramaticamente. A inevitabilidade do aquecimento global causado pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico provocou uma preocupação global, e colocou em marcha um esforço de pesquisa internacional. Os programas de conservação, incluindo a reprodução de espécies ameaçadas em cativeiro, salvaram

alguns animais e plantas da extinção certa. Eles também aumentaram a sensibilidade do público para as questões ambientais e, algumas vezes, geraram polêmicas públicas.

Esses sucessos não teriam sido possíveis sem um consenso geral fundamentado em evidências produzidas pelo estudo científico do mundo natural. Compreender a ecologia não vai, por si só, resolver os nossos problemas ambientais, porque estes também têm dimensões políticas, econômicas e sociais. No entanto, quando contemplamos a necessidade de uma gestão global dos sistemas naturais, a nossa eficácia nesta empreitada depende criticamente de nossa compreensão da sua estrutura e funcionamento – uma compreensão que depende dos conhecimentos dos princípios da ecologia.

Este livro introduz o leitor no estudo da ecologia, construindo uma compreensão de todos os aspectos da disciplina. Começamos por olhar o nível individual, incluindo como as espécies se adaptaram aos desafios dos ambientes aquáticos e terrestres. Então, exploraremos o tema da evolução, incluindo como as espécies desenvolveram várias estratégias para o acasalamento, a reprodução e a vida em grupos sociais. Em seguida, passaremos para o nível da população com uma discussão da distribuição, crescimento e dinâmica das populações no espaço e no tempo. Com uma sólida compreensão das populações, passaremos a analisar interações entre espécies, comunidades e ecossistemas. Finalmente, consideraremos a ecologia no nível global e investigaremos os padrões de biodiversidade e conservação.

## ECOLOGIA HOJE | CORRELAÇÃO DOS CONCEITOS

### LONTRA MARINHA DA CALIFÓRNIA



**Lontra marinha da Califórnia.** Este mamífero marinho, anteriormente abundante, sofreu grandes flutuações em suas populações como resultado das atividades humanas nos últimos três séculos. (Fotografia de Neil A. Fisher.)

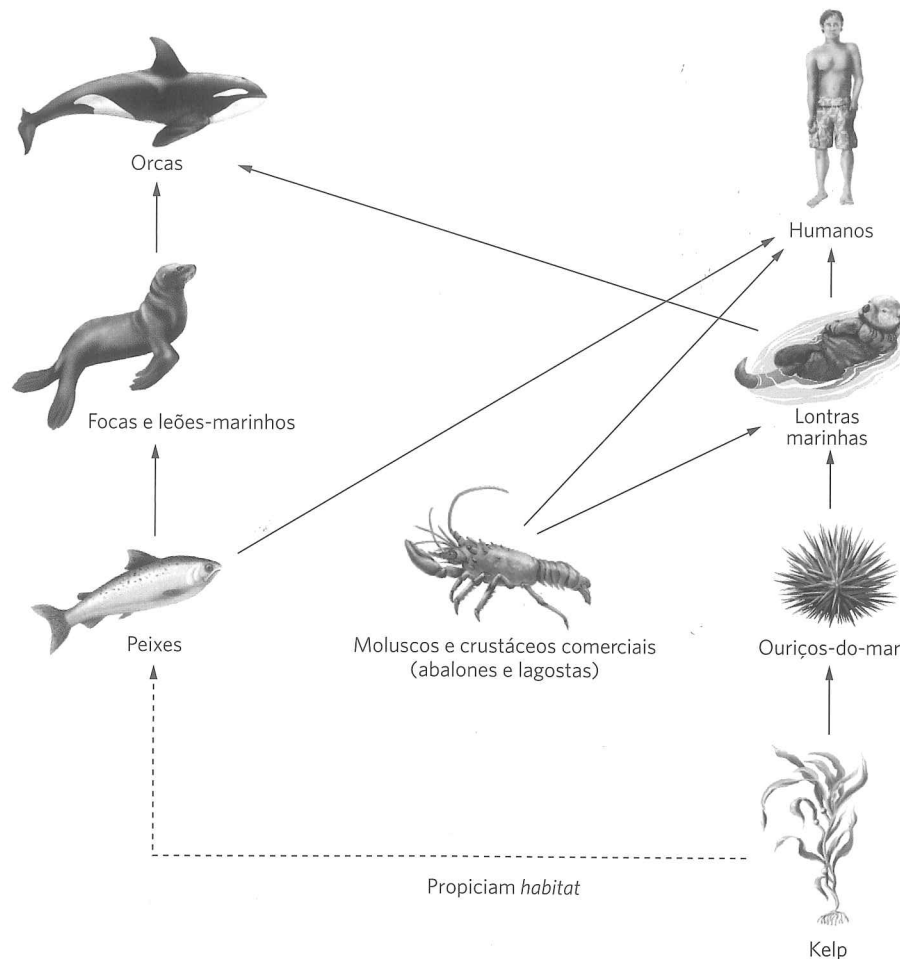
No fim de cada capítulo, queremos refletir sobre os temas abordados e explorar como esses assuntos estão interligados. Neste primeiro capítulo, examinamos uma ampla gama de tópicos, incluindo a hierarquia das perspectivas na ecologia, os princípios biológicos e físicos que regem os sistemas naturais, a variedade de papéis que desempenham diferentes espécies, as múltiplas abordagens para estudar a ecologia, e a influência dos humanos sobre os sistemas ecológicos. Para ajudá-lo a ver como esse tópico se interconecta, vamos analisar um estudo de caso da lontra marinha (*Enhydra lutris*) ao largo da costa do Pacífico. Os humanos têm afetado as populações da lontra marinha por centenas de anos; várias abordagens científicas têm sido adotadas para entender esses impactos e ajudar a revertê-los.

A lontra marinha já foi abundante, com uma distribuição geográfica que se estendia em torno dos limites do Pacífico norte, desde o Japão até o Alasca, e para baixo até a *Baja California*. No entanto, nos anos 1700 e 1800, a caça intensa de lontras para obtenção de peles reduziu a população à beira da extinção, e a indústria de peles posteriormente entrou em colapso. Quando uma população pequena foi descoberta ao largo da costa central da Califórnia na década de 1930, as lontras foram colocadas sob proteção. Em consequência,

a população aumentou para vários milhares de indivíduos na década de 1990, embora, em anos mais recentes, a lontra tenha novamente experimentado declínios populacionais. Essas mudanças no tamanho das populações de lontras criaram uma oportunidade para os cientistas examinarem um experimento natural em ação.

Os ecólogos rapidamente perceberam que, para entender as causas e as consequências das flutuações da abundância da lontra marinha, eles precisavam usar uma variedade de abordagens ecológicas, desde o indivíduo até o ecossistema. Adotando uma abordagem individual, os ecólogos estabeleceram que a lontra marinha era um predador de uma ampla gama de espécies de presas, incluindo abalone, lagostas, peixes pequenos, caranguejos, ouriços-do-mar e pequenos moluscos. Dentre essas presas, observações de comportamento alimentar da lontra revelaram que elas preferem presas como abalone, uma grande espécie de gastrópode marinho. Elas só comem outras pequenas espécies de moluscos quando sua presa preferencial torna-se rara.

Uma vez que os cientistas compreenderam o nicho da lontra marinha, puderam ser mais capazes de protegê-la. No entanto, nem todo mundo estava satisfeito com o ressurgimento de lontras marinhas na década de 1990. Os pescadores da Cali-



**Lontras marinhas e as espécies com as quais interagem.** Uma vez que os cientistas determinaram as principais espécies no oceano que afetaram a abundância de populações de lontra, eles puderam protegê-las melhor da extinção.

fórnica ficaram aborrecidos; eles argumentaram que a crescente população de lontras causaria uma mudança dramática na comunidade marinha, incluindo uma redução drástica das populações de peixes com valor comercial, abalones e lagostas espinhosas – todos pescados para consumo humano. No entanto, os cientistas que adotaram uma abordagem de comunidades em ecologia descobriram que um aumento da população de lontras também estava tendo outros efeitos dramáticos sobre a comunidade marinha. Por exemplo, o consumo pela lontra de ouriços-do-mar – invertebrados marinhos que comem *kelps* – estava causando um aumento nas *kelps* (Figura 1.8). Estas podem ser coletadas para produção de fertilizantes, alimentos e produtos farmacêuticos. Assim, a crescente população de lontras causou a redução de ouriços-do-mar, o aumento das populações de *kelps* e o aumento da coleta comercial de *kelps*. Em resumo, o aumento nas *kelps* também proporcionou um refúgio para peixes jovens contra os predadores e um lugar que pudessem se alimentar. Assim, a lontra marinha desempenha um papel fundamental na determinação da composição da comunidade de ecossistemas marinhos costeiros.

Na década de 1990, a população de lontras marinhas misteriosamente começou a declinar. Para entender esse declínio, os cientistas usaram abordagens de indivíduo, comunidade e de ecossistema. Em 1998, os pesquisadores mostraram que as populações de lontras nas proximidades das Ilhas Aleutas, no Alasca, tinham declinado vertiginosamente durante a década de 1990. O motivo foi que as baleias assassinas, ou orcas (*Orcinus orca*), que anteriormente não atacavam lontras, tinham começado a chegar perto da costa, onde consumiam grande número de lontras. Por que as baleias assassinas adotaram esse novo comportamento? Os pesquisadores apontaram que as populações das principais presas das baleias assassinas – focas e leões-marinhos – colapsaram durante o mesmo período, talvez induzindo as baleias a caçar as lontras como uma fonte alternativa de alimento. Por que as focas e leões-marinhos declinaram? Neste momento, só podemos especular, mas intensas pescarias humanas reduziram os estoques de peixes explorados pelas focas a níveis baixos o bastante para ameaçar seriamente as populações de focas.

Também houve quedas nas populações de lontras ao longo da costa da Califórnia. Inicialmente, o declínio nas lontras marinhas foi atribuído ao uso de redes ao longo da costa que, inadvertidamente, matou lontras em números substanciais. Uma legislação posterior deslocou a pesca para longe da costa, a fim de ajudar a proteger as lontras. Nessa mesma região, as lontras também estavam morrendo de infecções por dois parasitas protistas, *Toxoplasma gondii* e *Sarcocystis neurona*, os quais causam uma inflamação le-

tal do cérebro. Em 2010, por exemplo, 40 lontras marinhas mortas e moribundas foram encontradas perto de Morro Bay, Califórnia, e 94% estavam infectadas com *S. neurona*. Essa foi uma observação surpreendente, porque os únicos hospedeiros conhecidos desses parasitas são gambás (*Didelphis virginiana*) e várias espécies de gatos. Considerando que esses mamíferos vivem na terra, como é que as lontras marinhas foram infectadas?

Cientistas formularam hipóteses de ligações entre os ecossistemas terrestres e marinhos que estão possibilitando que os parasitas infectem as lontras marinhas. Até hoje, duas ligações em potencial têm sido sugeridas. Em primeiro lugar, gatos que passam muito tempo fora das casas defecam na terra e suas fezes contêm os parasitas; quando chove, os parasitas são carregados para córregos e rios locais e, por fim, encontram seu caminho até o oceano. Em segundo lugar, quando os humanos utilizam a descarga para descartar fezes e areia para gatos no vaso sanitário para o sistema de esgoto, as águas poluídas acabam por chegar ao oceano. Embora experimentos de manipulação tenham descoberto que os protistas não infectam invertebrados marinhos nem causam a doença, os invertebrados podem transportar os parasitas em seus corpos, inadvertidamente, ao se alimentar. Quando invertebrados infestados por parasitas são consumidos por lontras, estas se infectam. Nova pesquisa indica que abalones não são hospedeiros dos parasitas; enquanto pequenos moluscos marinhos são. Assim, quando as lontras têm abundância de seu alimento preferido, como o abalone, elas apresentam baixo risco de serem infectadas pelo parasita mortal. No entanto, quando o abalone se torna escasso, as lontras são forçadas a se alimentar de pequenos moluscos que carregam o parasita, o que aumenta drasticamente o risco de infecção e morte.

A história da lontra marinha destaca a importância de compreender a ecologia a partir de múltiplas abordagens, utilizando experimentos tanto de manipulação quanto naturais. Ela também ressalta os múltiplos papéis que as espécies podem desempenhar nas comunidades e ecossistemas, e como os humanos podem influenciar dramaticamente o resultado. Esse entendimento pode então ser usado para tomar medidas para reverter os impactos negativos no ambiente. No caso da lontra marinha, campanhas de educação agora encorajam o público a manter seus gatos dentro de casa e descartar a areia para gatos no lixo, em vez de jogá-la no vaso sanitário.

---

Fontes: Johnson CK et al. Prey choice and habitat use drive sea otter pathogen exposure in a resource-limited coastal system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2009;106:2242-2247.

Miller MA. A protozoal-associated epizootic impacting marine wildlife: Mass mortality of southern sea otters (*Enhydra lutris nereis*) due to *Sarcocystis neurona* infection. *Veterinary Parasitology* 2010;172:183-194.

## RESUMO DO CAPÍTULO

■ **Os sistemas ecológicos existem em uma organização hierárquica.** A hierarquia começa com organismos individuais e move-se por níveis mais elevados de complexidade, incluindo populações, comunidades, ecossistemas e a biosfera. Em cada um desses níveis, os ecólogos estudam diferentes tipos de processos.

■ **Os sistemas ecológicos são governados por princípios físicos e biológicos.** Esses princípios incluem a conservação da matéria e da energia, estados de equilíbrio dinâmico, uma demanda para gastar energia, e a evolução de novos fenótipos e novas espécies.

■ **Diferentes organismos desempenham diversos papéis nos sistemas ecológicos.** Os grandes grupos de organismos são as plantas, os animais, os fungos, os protistas e as bactérias. Esses organismos estão envolvidos em inúmeras interações entre espécies, incluindo competição, predação, mutualismo e comensalismo. Cada organismo vive em *habitats* específicos e tem um nicho definido.

■ **Os cientistas usam várias abordagens para estudar a ecologia.** Assim como todos os cientistas, os ecólogos usam o método científico para desenvolver e testar hipóteses.

O teste de hipóteses próximas e finais pode ser realizado por meio de experimentos de manipulação, experimentos naturais ou modelos matemáticos.

■ **Os humanos influenciam os sistemas ecológicos.** O rápido crescimento da população humana nos últimos dois séculos aumentou a influência humana em sistemas ecológicos, principalmente como resultado dos recursos consumidos e rejeitos produzidos.

## QUESTÕES DE REVISÃO

1. O que é ecologia?
2. Por que os ecólogos consideram tanto os indivíduos quanto os ecossistemas como sistemas ecológicos?
3. Quais são os processos únicos que são examinados ao adotar as abordagens de indivíduo, de população, de comunidade e de ecossistema para estudar ecologia?
4. Descreva como sistemas ecológicos são regidos por princípios gerais físicos e biológicos.
5. Como se diferem as fontes de aquisição de energia por plantas, animais e fungos?
6. Compare e confronte as diferenças de *habitat* de um organismo e seu nicho.
7. No Hemisfério Norte, muitas espécies de aves voam para o sul durante os meses de outono. Proponha uma hipótese proximal e uma final para esse comportamento.
8. Quando as manipulações experimentais são conduzidas para testar uma hipótese, qual é a finalidade de incluir um controle?
9. De que modo os experimentos de manipulação diferem dos experimentos naturais?
10. Como o nosso conhecimento dos sistemas ecológicos pode ajudar os humanos a gerenciar esses sistemas?