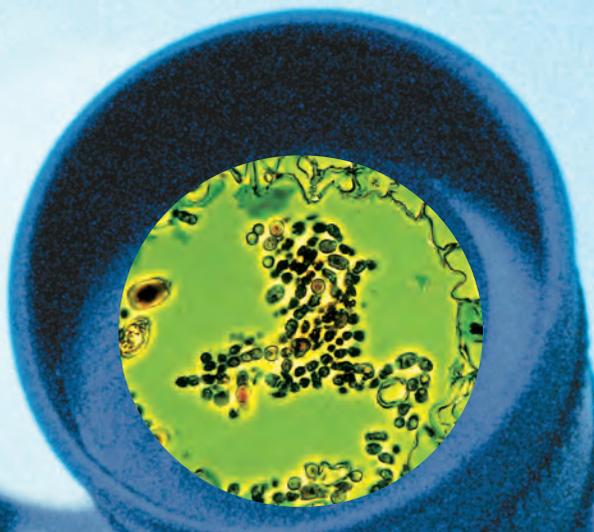


27 Microbiologia Ambiental

Nos capítulos anteriores, o nosso foco foi principalmente a capacidade dos micro-organismos de causar doenças. Neste capítulo, você vai aprender sobre muitos dos aspectos positivos dos micro-organismos no ambiente. Bactérias e outros micro-organismos são, de fato, essenciais para a manutenção da vida na Terra.

Os micro-organismos, especialmente aqueles que pertencem aos Domínios *Bacteria* e *Archaea*, vivem nos mais variados habitats da Terra. Eles são encontrados em fontes de água fervente, e mais de 5.000 bactérias foram isoladas de cada milímetro de neve no Polo Sul. Micro-organismos foram coletados de minúsculas aberturas em rochas a um quilômetro de profundidade. Explorações nas profundezas do oceano revelam um grande número de micro-organismos que vivem na eterna escuridão e sujeitos a incríveis pressões. Os micro-organismos também são encontrados em riachos formados nas montanhas pelo derretimento da neve e em águas quase saturadas de sal, tais como aquelas do Mar Morto.



SOB O MICROSCÓPIO

Anabaena azollae. Estes organismos (cadeia de células) são cianobactérias fixadoras de nitrogênio que vivem simbioticamente dentro da cavidade da folha da planta de água doce, *Azolla*.

P&R

O que estes micro-organismos têm causado ao cultivo de arroz na Ásia?

Procure pela resposta neste capítulo.

Diversidade microbiana e habitats

OBJETIVOS DO APRENDIZADO

- 27-1 Definir *extremófilos* e identificar dois habitats "extremos".
- 27-2 Definir *simbiose*.
- 27-3 Definir *micorriza*, diferenciar endomicorriza de ectomicorriza e dar um exemplo de cada.

A diversidade de populações microbianas indica que elas tiram proveito de qualquer nicho encontrado em seu ambiente. Diferentes quantidades de oxigênio, luz ou nutrientes podem existir dentro de alguns milímetros de solo. Como uma população de organismos aeróbicos utiliza todo o oxigênio disponível, os anaeróbicos são capazes de se desenvolver. Se o solo é perturbado por aragem, minhocas ou outras atividades, os aeróbicos terão novamente capacidade de crescer, repetindo essa sucessão.

Os micro-organismos que vivem em condições extremas de temperatura, acidez, alcalinidade ou salinidade são denominados **extremófilos**. Muitos são membros das arqueobactérias. As enzimas (**extremozimas**) que tornam o crescimento possível sob essas condições têm sido de grande interesse para as indústrias, porque podem tolerar extremos de temperatura, salinidade e pH que poderiam inativar outras enzimas. O organismo *Thermus aquaticus*, encontrado em fontes de água quente no Parque Nacional Yellowstone, é uma fonte da enzima *Taq-polimerase* usada na técnica da reação em cadeia da polimerase (PCR, de *polymerase chain reaction*) (veja a página 251). A enzima funciona em temperaturas superiores a 95°C, o ponto de ebulição da água onde o organismo habita. Em outro extremo, a bactéria tem sido encontrada em folhas congeladas na Antártida e na Groenlândia, de alguma maneira sobrevivendo a temperaturas abaixo de -40°C, dentro de uma película de água com apenas cerca de três moléculas de espessura. No deserto sem chuva do Atacama no Chile, uma espécie de cianobactéria vive dentro de cristais de sal. Ela absorve a umidade da atmosfera todas as noites e sua energia é obtida da luz solar.

Os micro-organismos vivem em um ambiente extremamente competitivo e devem explorar todas as vantagens que puderem. Eles devem metabolizar nutrientes comuns mais rapidamente ou utilizar nutrientes que os micro-organismos competidores não podem metabolizar. Alguns, como a bactéria do ácido láctico, que é muito útil na produção de laticínios, são capazes de tornar o nicho ambiental inóspito para os organismos competidores. As bactérias do ácido láctico são incapazes de utilizar o oxigênio como aceptor de elétrons e somente podem fermentar açúcares até ácido láctico, deixando a maior parte da energia sem utilização. Entretanto, a acidez inibe o crescimento dos micro-organismos mais eficientes e competidores.

Simbiose

Recorde do Capítulo 14 que **simbiose** é uma associação fechada de dois organismos diferentes vivendo juntos e que beneficia um ou ambos. Economicamente, o exemplo mais importante de uma

simbiose animal-micro-organismo é a dos ruminantes, animais que possuem um órgão digestório denominado *rúmen*. Ruminantes, como bovinos e ovinos, pastam plantas ricas em celulose. As bactérias no rúmen fermentam a celulose em compostos que são absorvidos pelo sangue do animal, para serem utilizados posteriormente como fonte de carbono e energia. Os protozoários do rúmen mantêm a população bacteriana sob controle alimentando-se dela.

Uma contribuição muito importante para o crescimento das plantas é feita por **micorrizas**, ou micorrizas simbióticas (*mico* = fungo; *rizo* = raiz). Existem dois tipos desses fungos: as *endomicorrizas*, também conhecidas como *micorrizas vesicular-arbusculares*, e as *ectomicorrizas*. Ambos os tipos funcionam como pelos radiculares nas plantas; ou seja, eles aumentam a área de superfície através da qual a planta pode absorver nutrientes, especialmente fósforo, que não é muito móvel no solo.

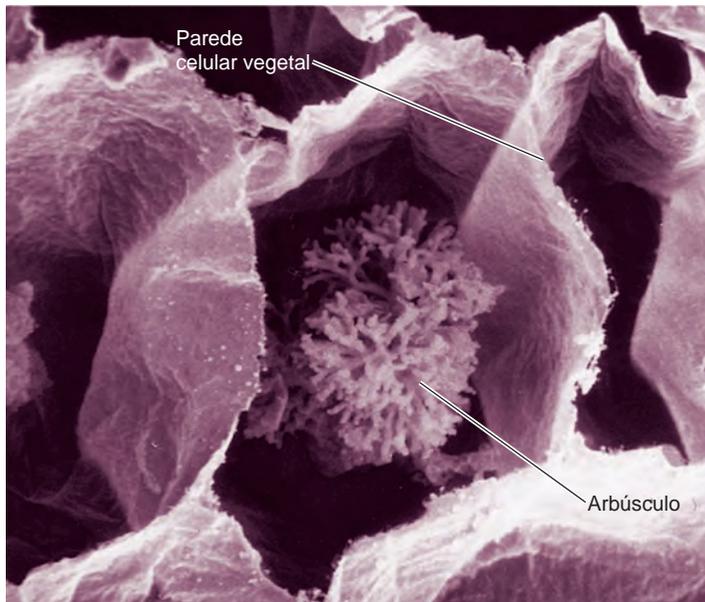
As micorrizas vesicular-arbusculares formam grandes esporos que podem ser facilmente isolados do solo por peneiração. As hifas formadas a partir desses esporos germinados penetram na raiz da planta e formam dois tipos de estruturas: vesículas e arbúsculos. As **vesículas** são corpos ovais lisos que provavelmente funcionam como estruturas de armazenamento. Os **arbúsculos**, pequenas estruturas em forma de arbusto, são formados dentro das células das plantas (**Figura 27.1a**). Os nutrientes percorrem o solo através das hifas fúngicas para estes arbúsculos, os quais gradualmente se rompem e liberam os nutrientes para as plantas. Muitas gramíneas e outras plantas são surpreendentemente dependentes desses fungos para um crescimento adequado, e sua presença é quase universal no reino das plantas.

As ectomicorrizas infectam principalmente árvores como o pinho e o carvalho. Os fungos formam uma *camada* micelial sobre as raízes menores das árvores (**Figura 27.1b**). As ectomicorrizas não formam vesículas ou arbúsculos. Administradores de fazendas de plantação de pinho devem assegurar que as mudas sejam inoculadas com o solo contendo micorrizas efetivas (**Figure 27.2a**).

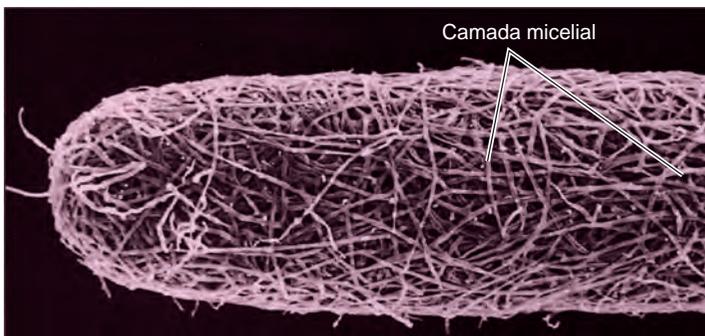
As trufas, conhecidas como iguarias, são ectomicorrizas, normalmente encontradas em carvalhos (**Figura 27.2b**). Na Europa, porcos ou cachorros adestrados são usados para encontrá-las pelo faro e desenterrá-las. Para um porco, macho ou fêmea, o mais importante do cheiro da trufa é o dimetil sulfeto, que também é responsável pelo odor do repolho. Na natureza, a proliferação dos fungos depende da ingestão por um animal, que distribui os esporos não digeridos para novos locais. Cada vez mais o cultivo de trufas tem sido explorado na agricultura. Carvalhos são plantados em grupos e inoculados artificialmente com esporos de fungos cultivados em laboratório ou extraídos de trufas maduras.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Você pode identificar dois ambientes extremos de organismos extremófilos? **27-1**
- ✓ Qual é a definição de *simbiose*? **27-2**
- ✓ A trufa é um exemplo de endomicorriza ou ectomicorriza? **27-3**



(a) **Endomicorriza (micorriza vesicular-arbuscular)**. Um arbúsculo de uma endomicorriza totalmente desenvolvido em uma célula vegetal. (O termo arbúsculo significa pequeno arbusto.) Assim que o arbúsculo se decompõe, ele libera nutrientes para a planta.



(b) **Ectomicorriza**. A camada micelial de um fungo ectomicorrízico típico recobre a raiz de um eucalipto.

Figura 27.1 Micorriza.

P Qual o valor da micorriza para a planta?

Microbiologia do solo e ciclos biogeoquímicos

OBJETIVOS DO APRENDIZADO

- 27-4** Definir *ciclo biogeoquímico*.
- 27-5** Esboçar o ciclo do carbono e explicar o papel dos micro-organismos neste ciclo.
- 27-6** Esboçar o ciclo do nitrogênio e explicar o papel dos micro-organismos neste ciclo.
- 27-7** Definir *amonificação*, *nitrificação*, *desnitrificação* e *fixação do nitrogênio*.
- 27-8** Esboçar o ciclo do enxofre e explicar o papel dos micro-organismos neste ciclo.

27-9 Descrever como uma comunidade ecológica pode existir sem a energia da luz.

27-10 Comparar e contrastar os ciclos do carbono e do fósforo.

27-11 Dar dois exemplos do uso de bactérias para remover poluentes.

27-12 Definir *biorremediação*.

Bilhões de organismos, incluindo aqueles que são microscópicos, bem como grandes insetos e minhocas, formam uma comunidade viva e muito ativa no solo. Um solo típico tem milhões de bactérias em cada grama. Um grama de solo pode parecer uma amostra pequena, mas pode fornecer algumas estatísticas surpreendentes. Estima-se que deva ter 20.000 metros quadrados de área de superfície. O número de bactérias nessa amostra pode ser de aproximadamente 1 bilhão (embora somente cerca de 1% possa ser cultivado), e ela deve conter mais de um quilômetro de hifas de fungos. Mesmo assim, somente uma minúscula fração da área de superfície disponível em um grama de solo é colonizada por micro-organismos. A população microbiana do solo é maior a poucos centímetros do topo e diminui rapidamente com a profundidade. As bactérias são os organismos mais numerosos no solo. Embora actinomicetos sejam bactérias, eles em geral são considerados separadamente.

Populações de bactérias do solo geralmente são estimadas utilizando-se contagem em placas em meio nutriente, e os números atuais são provavelmente subestimados por esse método. Nenhum meio nutriente simples ou condição de crescimento pode satisfazer todos os requisitos nutricionais e outras condições dos micro-organismos do solo.

Podemos pensar no solo como um “fogo biológico”. Uma folha caindo de uma árvore é consumida por esse “fogo”, assim como os micro-organismos do solo metabolizam a matéria orgânica dessas folhas. Elementos da folha entram nos **ciclos biogeoquímicos** do carbono, do nitrogênio e do enxofre, que serão discutidos neste capítulo. Nos ciclos biogeoquímicos, os elementos são oxidados e reduzidos por micro-organismos para satisfazer as suas necessidades metabólicas. (Veja a discussão de oxidação-redução no Capítulo 5, página 122.) Sem os ciclos biogeoquímicos, a vida na Terra deixaria de existir.

Ciclo do carbono

O ciclo biogeoquímico primário é o **ciclo do carbono** (Figura 27.3). Todos os organismos, incluindo plantas, micro-organismos e animais, contêm grandes quantidades de carbono na forma de compostos orgânicos, como celulose, amidos, gorduras e proteínas. Vamos focar a atenção no modo como estes compostos orgânicos são formados.

Revendo o Capítulo 5, os autotróficos realizam um papel essencial para a vida na Terra pela redução do dióxido de carbono para formar matéria orgânica. Quando você olha uma árvore, você deve pensar que sua massa vem do solo onde ela cresce. Na verdade, sua grande massa de celulose é derivada de 0,03% do dióxido de carbono na atmosfera. Isso ocorre como um resultado da fotossíntese, a primeira etapa do ciclo do carbono na qual os fototróficos, como as cianobactérias, as plantas verdes, as algas e as bactérias verdes e púrpuras sulfurosas, *fixam* (incorporam) o dióxido de carbono em matéria orgânica usando a energia da luz solar.

Figura 27.2 As micorrizas e seu considerável valor comercial.

P Por que as micorrizas são importantes para a absorção de fósforo?



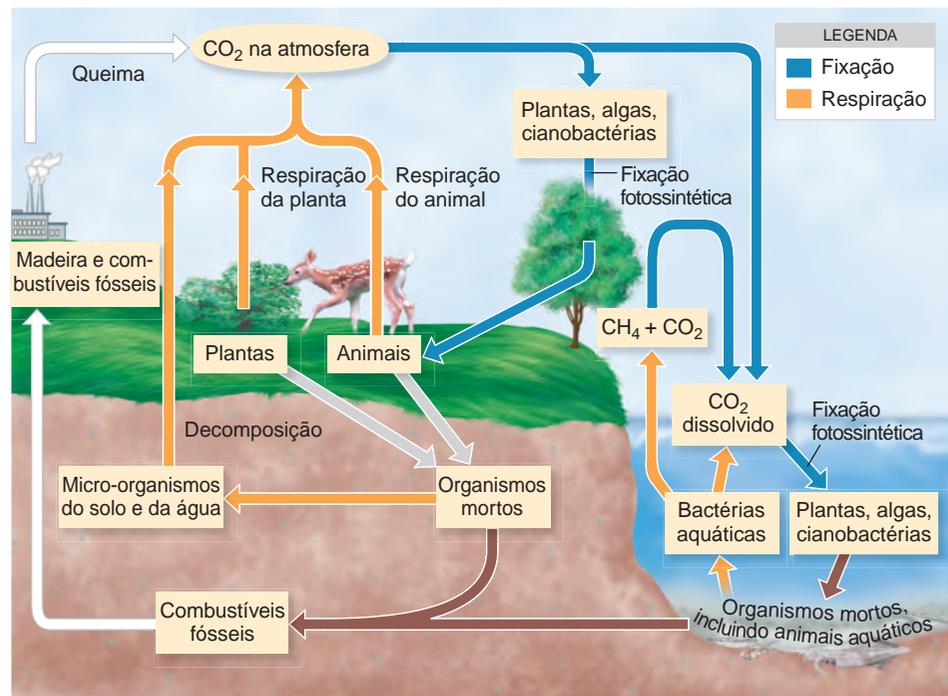
(a) A infecção por micorriza influencia fortemente o crescimento de muitas plantas. O crescimento relativo de duas mudas de pinho é mostrado: a muda da esquerda foi inoculada com micorrizas; a muda da direita não.



(b) Trufas. Das três trufas mostradas, uma foi cortada para mostrar seu interior.

Figura 27.3 O ciclo do carbono. Em uma escala global, o retorno do CO₂ para a atmosfera pela respiração equilibra sua remoção pela fixação. Entretanto, a queima de madeira e combustíveis fósseis adiciona mais CO₂ à atmosfera; como resultado, a quantidade de CO₂ atmosférico está constantemente aumentando.

P Como o acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera afeta o clima da Terra?



Na próxima etapa do ciclo, quimio-heterotróficos como animais e protozoários alimentam-se de autotróficos e podem, por sua vez, ser consumidos por outros animais. Desse modo, como os componentes orgânicos dos autotróficos são digeridos e ressintetizados, os átomos de carbono do dióxido de carbono são transferidos de organismo para organismo na cadeia alimentar.

Quimio-heterotróficos, incluindo os animais, utilizam algumas moléculas orgânicas para satisfazer suas necessidades de energia. Quando essa energia é liberada por meio da respiração, o dióxido de carbono imediatamente se torna disponível para iniciar no-

vamente o ciclo. Grande parte do carbono permanece dentro dos organismos até que eles excretem o carbono ou morram. Quando plantas e animais morrem, esses compostos orgânicos são decompostos por bactérias e fungos. Durante a decomposição, os compostos orgânicos são oxidados, e o CO₂ retorna para o ciclo.

O carbono é armazenado em rochas, como a pedra calcária (CaCO₃), e é dissolvido como íon carbonato (CO₃²⁻) nos oceanos. Existem muitos depósitos de matéria orgânica fóssil na forma de combustível fóssil, como o carvão e o petróleo. A queima desses combustíveis fósseis libera CO₂, aumentando a quantidade de CO₂

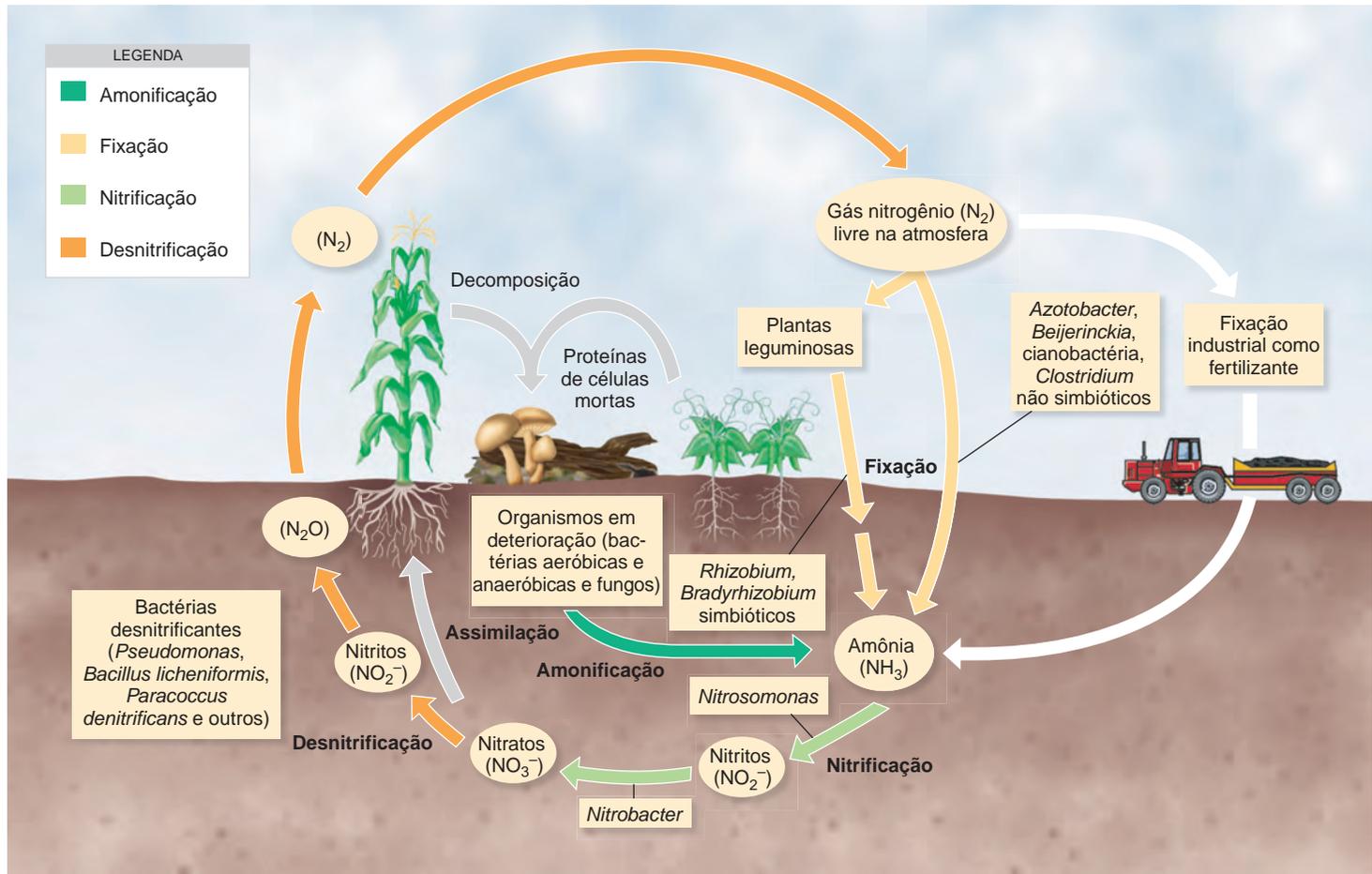


Figura 27.4 O ciclo do nitrogênio. Em geral, o nitrogênio na atmosfera passa por fixação, nitrificação e desnitrificação. Os nitratos assimilados pelas plantas e pelos animais após a nitrificação passam por decomposição, amonificação e, então, nitrificação novamente.

P Quais processos são realizados exclusivamente pelas bactérias?

na atmosfera. Muitos cientistas acreditam que o aumento do dióxido de carbono na atmosfera possa estar causando um **aquecimento global** da Terra.

Um aspecto interessante do ciclo do carbono é o gás metano (CH_4). Estima-se que sedimentos do fundo do oceano contenham 10 trilhões de toneladas de metano, aproximadamente duas vezes mais a quantidade de depósitos de combustíveis fósseis da Terra, como o carvão e o petróleo. Além disso, as bactérias metanogênicas nas profundezas do oceano estão constantemente produzindo mais (veja Microbiota marinha na página 777). O metano é muito mais potente como um gás de efeito estufa que o dióxido de carbono, e o ambiente da Terra seria perigosamente alterado se todo esse gás escapasse para a atmosfera.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Qual ciclo biogeoquímico é muito conhecido por contribuir para o aquecimento global? **27-4**

- ✓ Qual é a principal fonte de carbono na massa formadora de celulose de uma floresta? **27-5**

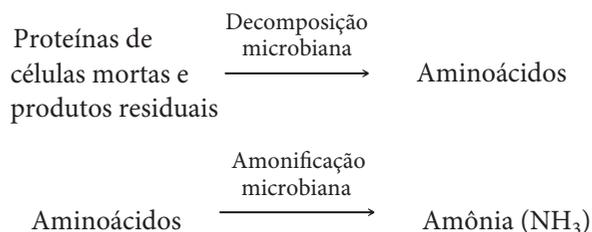
Ciclo do nitrogênio

O **ciclo do nitrogênio** é mostrado na **Figura 27.4**. Todos os organismos necessitam de nitrogênio para sintetizar proteínas, ácidos nucleicos e outros compostos contendo nitrogênio. O nitrogênio molecular (N_2) compõe cerca de 80% da atmosfera da Terra. Para a assimilação e a utilização do nitrogênio pelas plantas, ele deve ser fixado, isto é, absorvido e combinado em compostos orgânicos. As atividades de micro-organismos específicos são importantes para a conversão do nitrogênio em formas aproveitáveis.

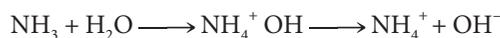
Amonificação

Quase todo o nitrogênio do solo existe em moléculas orgânicas, principalmente em proteínas. Quando um organismo morre, o processo de decomposição microbiana resulta na quebra hidrolí-

tica de proteínas em aminoácidos. Em um processo denominado **desaminação**, os grupamentos amina dos aminoácidos são removidos e convertidos em amônia (NH_3). Essa liberação de amônia é chamada de **amonificação** (veja a Figura 27.4). A amonificação, realizada por diversas bactérias e fungos, pode ser representada da seguinte forma:



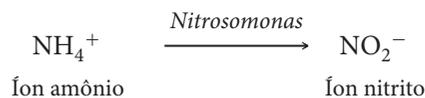
O crescimento microbiano libera enzimas proteolíticas extracelulares que decompõem as proteínas. Os aminoácidos resultantes são transportados para dentro das células microbianas, onde a amonificação ocorre. O destino da amônia produzida por amonificação depende das condições do solo (veja a discussão sobre desnitrificação a seguir). Como a amônia é um gás, ela desaparece rapidamente do solo seco, mas em solo úmido torna-se solúvel em água, e íons amônio (NH_4^+) são formados:



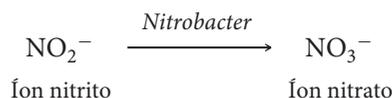
Íons amônio desta sequência de reações são utilizados por bactérias e plantas para a síntese de aminoácidos.

Nitrificação

A próxima sequência de reações no ciclo do nitrogênio envolve a oxidação de nitrogênio em íons amônio para produzir nitrato, um processo denominado **nitrificação**. As bactérias que vivem no solo são as bactérias autotróficas nitrificantes, como as dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*. Esses micro-organismos obtêm energia pela oxidação da amônia ou do nitrito. No primeiro estágio, *Nitrosomonas* oxida amônia em nitrito:



No segundo estágio, organismos como *Nitrobacter* oxidam nitritos em nitratos:

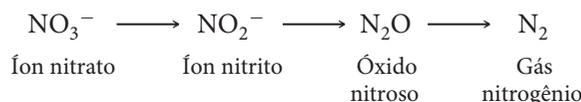


As plantas tendem a utilizar o nitrato como fonte de nitrogênio para a síntese de proteínas porque o nitrato é altamente móvel no solo e encontra uma raiz de planta mais facilmente do que a amônia. Os íons amônio seriam realmente uma fonte mais eficiente de nitrogênio, uma vez que necessitam de menos energia para serem incorporados às proteínas, porém esses íons carregados positiva-

mente estão normalmente ligados à argila do solo carregada negativamente, enquanto que os íons nitrato, carregados negativamente, não estão ligados.

Desnitrificação

A forma de nitrogênio resultante da nitrificação está completamente oxidada e não contém mais qualquer energia biologicamente utilizável. Entretanto, pode ser utilizada comoceptor de elétrons por micro-organismos que metabolizam outras fontes de energia orgânica na ausência do oxigênio atmosférico (veja a discussão sobre a respiração anaeróbica no Capítulo 5). Esse processo, denominado **desnitrificação**, pode levar à perda de nitrogênio para a atmosfera, especialmente como gás nitrogênio. A desnitrificação pode ser representada da seguinte forma:



A desnitrificação ocorre em solos alagados, onde pouco oxigênio está disponível. Na ausência do oxigênio comoceptor de elétrons, as bactérias desnitrificantes substituem o nitrato dos fertilizantes agrícolas. Elas convertem grande parte do nitrato útil em nitrogênio gasoso, que entra na atmosfera e representa uma perda econômica considerável.

Fixação do nitrogênio

Vivemos no fundo de um oceano de gás nitrogênio. O ar que respiramos contém aproximadamente 79% de nitrogênio, e acima de cada acre de solo (a área de um campo de futebol americano, da linha do gol até a linha de 10 jardas opostas, ou 50,6 x 80 metros) encontra-se uma coluna de nitrogênio pesando em torno de 32.000 toneladas. Porém, as únicas criaturas da Terra que podem usá-lo diretamente como fonte de nitrogênio são algumas espécies de bactérias, incluindo as cianobactérias. O processo pelo qual elas convertem o gás nitrogênio em amônia é conhecido como **fixação do nitrogênio**.

As bactérias que são responsáveis pela fixação do nitrogênio dependem da enzima *nitrogenase*. Estima-se que todo o suprimento da Terra dessa enzima essencial caberia dentro de um único balde grande. Uma característica da nitrogenase é que ela é inativada pelo oxigênio. Portanto, é provável que ela tenha evoluído cedo na história do planeta, antes que a atmosfera contivesse muito oxigênio molecular e depois que os compostos contendo nitrogênio estivessem disponíveis a partir da matéria orgânica decomposta. A fixação do nitrogênio é realizada por dois tipos de micro-organismos: de vida livre e simbióticos. (Os fertilizantes agrícolas são compostos de nitrogênio que são fixados por processos físico-químicos industriais.)

Bactérias de vida livre fixadoras de nitrogênio. As bactérias de vida livre fixadoras de nitrogênio são encontradas particularmente em altas concentrações na *rizosfera*, uma região de aproximadamente 2 mm da raiz da planta. A rizosfera representa algo como um oásis nutricional no solo, principalmente em pastagens. En-

tre as bactérias de vida livre que podem fixar nitrogênio estão as espécies aeróbicas como *Azotobacter*. Esses organismos aeróbicos aparentemente protegem a enzima anaeróbica nitrogenase do oxigênio por, dentre outras coisas, ter uma alta taxa de utilização do oxigênio que minimiza a difusão do mesmo para dentro da célula, onde a enzima está localizada.

Outro aeróbico obrigatório de vida livre que fixa nitrogênio é *Beijerinckia*. Algumas bactérias anaeróbicas, como certas espécies de *Clostridium*, também fixam nitrogênio. A bactéria *C. pasteurianum*, um micro-organismo anaeróbico obrigatório fixador de nitrogênio, é um exemplo proeminente.

Existem muitas espécies de cianobactérias aeróbicas, fotossintetizantes, que fixam nitrogênio. Devido ao fato do seu suprimento de energia ser independente dos carboidratos no solo e na água, elas são fontes particularmente úteis no fornecimento de nitrogênio para o ambiente. As cianobactérias normalmente carregam suas enzimas nitrogenases em estruturas especializadas denominadas **heterocistos**, que fornecem condições anaeróbicas para fixação (veja a Figura 11.13a, página 314).

A maioria das bactérias de vida livre fixadoras de nitrogênio é capaz de fixar grandes quantidades de nitrogênio sob condições de laboratório. Entretanto, no solo, normalmente existe uma escassa quantidade de carboidratos para fornecer a energia necessária para a redução de nitrogênio em amônia, que é então incorporada às proteínas. No entanto, essas bactérias fixadoras de nitrogênio contribuem muito para a economia de nitrogênio em áreas de pastagens, florestas e tundra ártica.

Bactérias simbióticas fixadoras de nitrogênio. As bactérias simbióticas fixadoras de nitrogênio desempenham um papel ainda mais importante no crescimento de plantas para o beneficiamento da colheita. Membros dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* e outros infectam as raízes de plantas leguminosas, como soja, feijão, ervilha, amendoim, alfafa e trevo. (Essas plantas importantes na agricultura são apenas algumas das milhares de espécies de leguminosas conhecidas, muitas das quais são plantas arbustivas ou pequenas árvores encontradas em solos pobres, em várias partes do mundo.) Os rizóbios, como estas bactérias comumente são conhecidas, estão especialmente adaptados às espécies de leguminosas em particular, nas quais formam os **nódulos de raízes** (Figura 27.5). O nitrogênio é então fixado por um processo simbiótico da planta e da bactéria. A planta fornece condições anaeróbicas e nutrientes para o crescimento da bactéria, e a bactéria fixa o nitrogênio, que pode ser incorporado às proteínas da planta.

Existem exemplos similares de fixação de nitrogênio simbiótica em plantas não leguminosas, como os amieiros. Essas árvores estão entre as primeiras a aparecerem nas florestas depois de queimadas ou glaciações. O amieiro é simbioticamente infectado por actinomicetos (*Frankia*) e forma nódulos nas raízes fixadoras de nitrogênio. O crescimento de 1 acre de amieiro pode fixar em torno de 50 kg de nitrogênio a cada ano; essas árvores então contribuem para a economia da floresta.

P&R Uma outra contribuição importante para a economia de nitrogênio nas florestas é realizada pelos **liquens**, que são combinações de fungos e algas ou uma cianobactéria, em uma relação mutualística (veja a Figura 12.9, página 340). Quando um simbiote é uma cianobactéria fixadora de nitrogênio, o produto é o nitrogênio fixado que eventualmente enriquece o solo da floresta. As cianobactérias de vida livre podem fixar quantidades significativas de nitrogênio em solos desérticos após as chuvas e na superfície do solo da tundra ártica. As plantações de arroz podem acumular um grande crescimento de organismos fixadores de nitrogênio. As cianobactérias também fazem simbiose com pequenas samambaias flutuantes, *Azolla*, que crescem intensamente em águas de arrozais (Figura 27.6). Tanto nitrogênio é fixado por esses micro-organismos que outros fertilizantes à base de nitrogênio frequentemente são desnecessários para o cultivo de arroz.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Qual é o nome mais comum do grupo de micro-organismos que oxidam o nitrogênio em uma forma móvel no solo e que podem ser utilizados para a nutrição de plantas? **27-6**
- ✓ Bactérias do gênero *Pseudomonas*, na ausência de oxigênio, podem utilizar o nitrogênio oxidado como um aceptor de elétrons, um processo que recebe qual nome no ciclo do nitrogênio? **27-7**

Ciclo do enxofre

O **ciclo do enxofre** (Figura 27.7) e o ciclo do nitrogênio são semelhantes por representarem vários estágios de oxidação desses elementos. As formas mais reduzidas do enxofre são os sulfetos, como o gás de odor desagradável sulfeto de hidrogênio (H_2S). Como o íon amônio do ciclo do nitrogênio, esse é um composto reduzido que geralmente se forma sob condições anaeróbicas. Por sua vez, ele representa uma fonte de energia para bactérias autotróficas. Essas bactérias convertem o enxofre reduzido H_2S em grânulos de enxofre elementar e sulfatos completamente oxidados (SO_4^{2-}).

Frequentemente, o enxofre elementar é liberado a partir de micro-organismos decompositores. Ele é essencialmente insolúvel em águas temperadas, e os micro-organismos têm dificuldade em absorvê-lo. Essa provavelmente seja a origem do grande acúmulo subterrâneo pré-histórico de enxofre.

Várias bactérias fototróficas, como as bactérias sulfurosas verdes e púrpuras, também oxidam H_2S , formando grânulos sulfurosos internos coloridos (veja a Figura 11.14, página 315). Como a *Beggiatoa*, elas podem oxidar mais enxofre a íons sulfato. É importante reconhecer que esses organismos estão utilizando a luz como energia; o sulfeto de hidrogênio é usado para reduzir o CO_2 (veja o Capítulo 5, página 140).

O sulfeto de hidrogênio pode ser utilizado como fonte de energia pelo *Thiobacillus* para produzir íons sulfato e ácido sulfúrico. O *Thiobacillus* pode crescer bem em pH baixo, como pH 2, e ser utilizado na mineração (veja a Figura 28.14, página 807). Plantas e bactérias incorporam sulfatos, que tornam-se parte dos aminoácidos que contêm enxofre para seres humanos e outros animais. Nes-

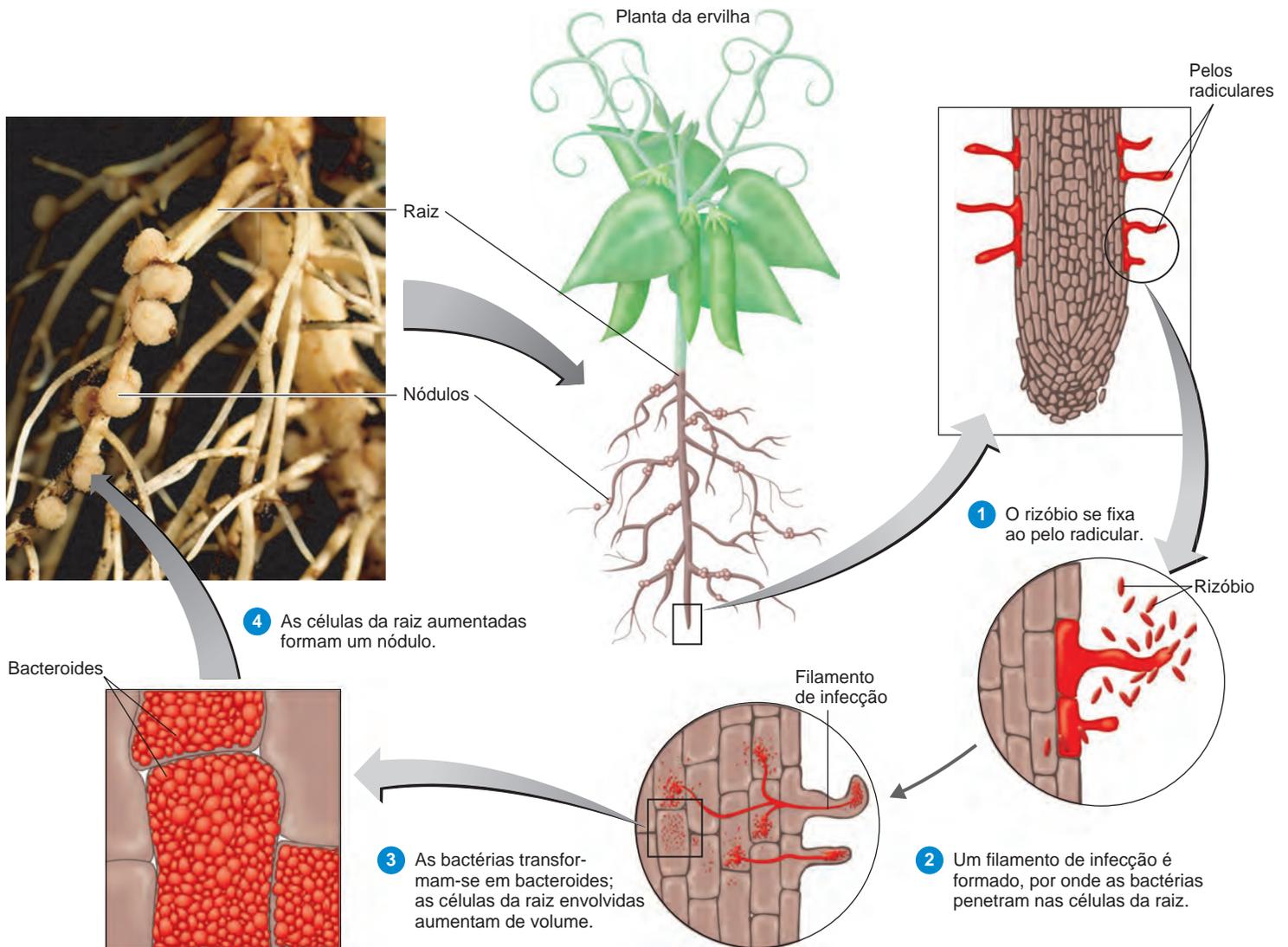


Figura 27.5 A formação de um nódulo de raiz. Membros dos gêneros fixadores de nitrogênio *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* formam esses nódulos em leguminosas. Essa associação mutualística é benéfica tanto para a planta quanto para a bactéria.

P Na natureza é mais provável que as plantas leguminosas sejam mais valiosas em terras agrícolas férteis ou solos desérticos pobres?

ses organismos, eles formam ligações dissulfeto que constituem a estrutura das proteínas. Como as proteínas são decompostas, em um processo denominado **dissimilação**, o enxofre é liberado como sulfeto de hidrogênio e reintegra o ciclo.

Vida sem a luz solar

Surpreendentemente, é possível que comunidades biológicas completas existam sem fotossíntese aproveitando a energia do H₂S. O Capítulo 11 (página 315) apresenta equações que mostram que a fotossíntese e o uso quimioautotrófico do H₂S são similares em

determinados aspectos. Tal comunidade ocorre, por exemplo, em orifícios do fundo do mar. Cavernas profundas, totalmente isoladas da luz solar, foram descobertas e também mantêm comunidades biológicas inteiras. Os **produtores primários** nesses sistemas são bactérias quimioautotróficas em vez de plantas ou micro-organismos fotoautotróficos

Recentemente, outro ecossistema microbiano que existe longe da luz solar foi descoberto a mais de 1 km de profundidade dentro de rochas, incluindo xistos, granitos e basaltos. Essas bactérias são denominadas **endolíticas** (dentro de rochas), que devem crescer na

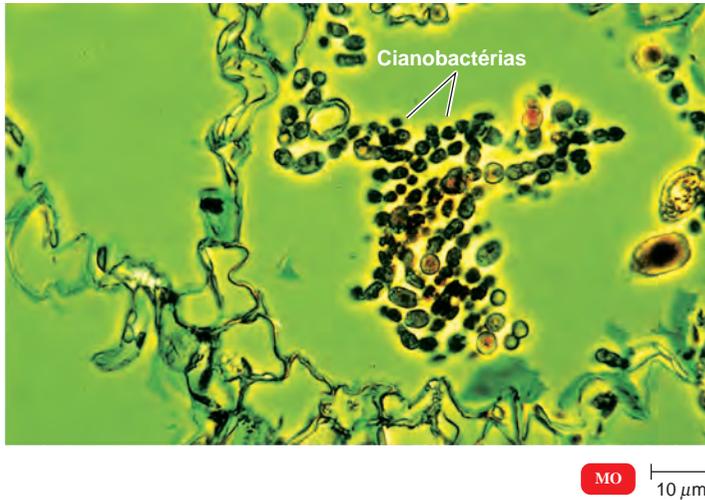


Figura 27.6 A simbiose *Azolla*-cianobactéria. Um corte através da folha de uma samambaia de água doce *Azolla*. A cianobactéria *Anabaena azollae* é visualizada como uma cadeia de células dentro da cavidade da folha.

P Qual é a maior contribuição da cianobactéria como um simbiote?

ausência quase total de oxigênio e com o mínimo de suprimento de nutrientes. Além disso, nessas rochas, reações químicas e radioatividade quebram H_2O , produzindo hidrogênio, que pode ser usado na produção de energia por bactérias autotróficas endolíticas. O dióxido de carbono dissolvido na água serve como fonte de carbono, e a matéria orgânica celular é produzida.

Parte da matéria orgânica é excretada, ou liberada, após a morte e a lise dos micro-organismos e se torna disponível para o crescimento de outros micro-organismos. A entrada de nutrientes, especialmente nitrogênio, é muito reduzida nesse ambiente, e os períodos de geração podem ser medidos em muitos anos. Estratégias de sobrevivência variadas são desenvolvidas para a vida com o mínimo de nutrição. Por exemplo, alguns desses micro-organismos

em um estado entre a vida e a morte tornam-se muito menores. Os ecologistas que especulam sobre as formas de vida que podem ser encontradas nos ambientes inóspitos de Marte estão muito interessados nos micro-organismos endolíticos.

Ciclo do fósforo

Outro elemento nutricional importante que faz parte do ciclo biogeoquímico é o fósforo. A disponibilidade do fósforo deve determinar se plantas e outros organismos podem crescer em uma área. Os problemas associados com excesso de fósforo (eutrofização) são descritos adiante neste capítulo.

O fósforo existe inicialmente como íon fosfato (PO_4^{3-}) e sofre pequenas modificações em seu estado de oxidação. O **ciclo do fósforo**, ao contrário, envolve mudanças de formas solúveis para insolúveis e de fosfato orgânico para inorgânico, frequentemente em relação ao pH. Por exemplo, o fosfato nas rochas pode ser solubilizado pelo ácido produzido por bactérias como o *Thiobacillus*. Diferente dos outros ciclos, não existe um produto volátil contendo fósforo para retornar fósforo para a atmosfera, da mesma forma que o dióxido de carbono, o gás nitrogênio e o dióxido de enxofre retornam. Portanto, o fósforo tende a acumular-se nos mares. Ele pode ser recuperado escavando-se o sedimento da superfície de mares antigos, principalmente como depósitos de fosfato de cálcio. As aves marinhas também extraem fósforo do mar alimentando-se de peixes que contêm fósforo e depositando-o como guano (fezes de aves). Algumas pequenas ilhas habitadas por essas aves são exploradas por causa desses depósitos como uma fonte de fósforo para fertilizantes.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Certas bactérias não fotossintéticas acumulam grânulos de enxofre dentro da célula; onde as bactérias usam sulfeto de hidrogênio ou sulfatos como fonte de energia? **27-8**
- ✓ Qual produto químico normalmente serve como fonte de energia para organismos que sobrevivem na escuridão? **27-9**
- ✓ Por que o fósforo tende a acumular-se nos mares? **27-10**

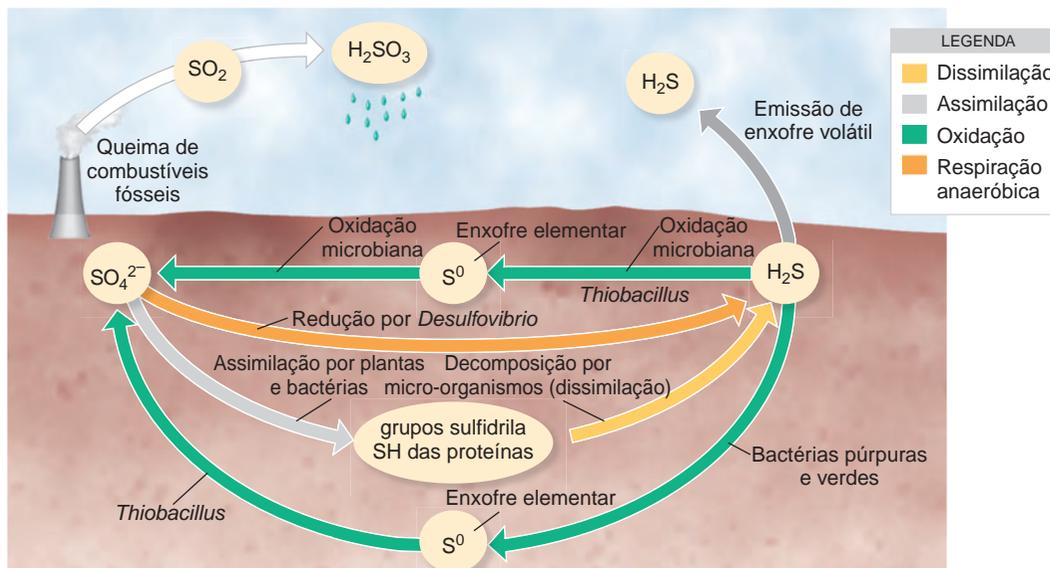


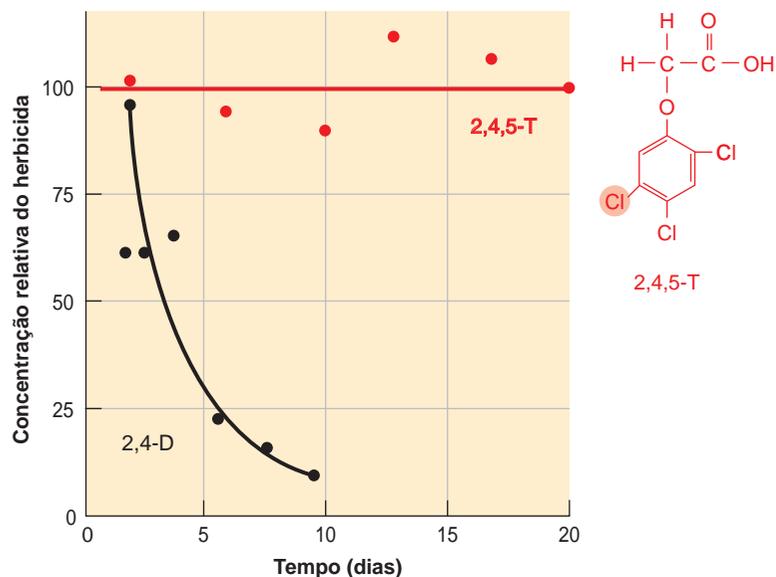
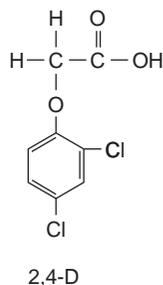
Figura 27.7 O ciclo do enxofre.

As formas reduzidas do enxofre como H_2S e enxofre elementar (S^0) são fontes de energia para muitos micro-organismos sob condições aeróbicas e anaeróbicas. Sob condições anaeróbicas, o H_2S pode ser usado como substituto de H_2O na fotossíntese por bactérias púrpuras e verdes (veja a página 777) para produzir S^0 . Formas oxidadas do enxofre, como sulfatos (SO_4^{2-}), são utilizadas como aceptores de elétrons, como um substituto para o oxigênio, sob condições anaeróbicas por certas bactérias. Muitos organismos assimilam sulfatos para produzir os grupos SH das proteínas.

P Por que todos os organismos necessitam de uma fonte de enxofre?

Figura 27.8 2,4-D (preto) e 2,4,5-T (vermelho). Este gráfico mostra as estruturas e as taxas de decomposição microbiana dos herbicidas 2,4-D (preto) e 2,4,5-T (vermelho).

P Qual dos dois herbicidas é mais facilmente degradado?



Degradação de produtos químicos sintéticos no solo e na água

Admitimos que os micro-organismos do solo degradam os materiais assim que estes entram no solo. Matéria orgânica natural, como folhas caídas ou resíduos animais, é prontamente degradada. Entretanto, nesta era industrial, muitos produtos químicos que não ocorrem na natureza (**xenobióticos**), como plásticos, entram no solo em grandes quantidades. Na realidade, os plásticos compreendem um quarto de todos os resíduos municipais. Uma proposta para a solução do problema é o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis feitos de polilactida (PLA), produzida pelo ácido láctico a partir da fermentação. Quando composto (veja a Figura 27.10, página 777), um copo de plástico, por exemplo, feito de PLA degrada-se em poucas semanas. As barreiras são econômicas e não tecnológicas. Muitos produtos químicos sintéticos, como os pesticidas, são altamente resistentes à degradação por ataque microbiano. Um exemplo bem conhecido é o inseticida DDT, que provou ser tão resistente que se acumulou em níveis prejudiciais no ambiente.

Alguns produtos químicos sintéticos são compostos de ligações e subunidades sujeitas ao ataque por enzimas bacterianas. Pequenas diferenças nas estruturas químicas podem fazer grandes diferenças na biodegradabilidade. O exemplo clássico é o dos herbicidas 2,4-D (o composto químico comum utilizado para matar ervas daninhas de gramado) e 2,4,5-T (usado para matar arbustos); ambos eram componentes do Agente Laranja, utilizado para desfolhar selvas durante a Guerra do Vietnã. A adição de um simples átomo de cloro à estrutura do 2,4-D aumenta a vida desse composto no solo de poucos dias a um período indefinido (Figura 27.8).

Um problema crescente é a lixiviação em águas subterrâneas de materiais tóxicos que não são biodegradáveis ou que degradam-se muito lentamente. As fontes desses materiais podem incluir aterros, depósitos de lixo industriais ilegais ou pesticidas aplicados em culturas agrícolas.

Biorremediação

O uso de micro-organismos para detoxificar ou degradar poluentes é denominado **biorremediação**. Derramamentos de óleo de navios-tanque naufragados representam um dos mais dramáticos exemplos de poluição química. As perdas econômicas por peixes e praias contaminados podem ser enormes. Até certo ponto, a biorremediação ocorre naturalmente à medida que os micro-organismos atacam o petróleo se as condições forem aeróbicas. Entretanto, os micro-organismos normalmente obtêm seus nutrientes em solução aquosa, e os produtos à base de óleo são relativamente insolúveis. Além disso, hidrocarbonetos de petróleo são deficientes em elementos essenciais, como o nitrogênio e o fósforo. A biorremediação de óleos derramados é bastante melhorada se um “fertilizante” contendo nitrogênio e fósforo for fornecido às bactérias residentes (Figura 27.9). A biorremediação também pode fazer uso de micro-organismos selecionados para se desenvolver em certos poluentes ou de certas bactérias modificadas que são especialmente adaptadas para metabolizar os produtos de petróleo. A adição desses micro-organismos especializados é denominada **bioaumento** (veja o quadro no Capítulo 2, página 33).

Resíduos sólidos municipais

Resíduos sólidos municipais (lixo) frequentemente são colocados em grandes aterros compactados de lixo. As condições são altamente anaeróbicas, e mesmo os materiais considerados biodegradáveis, como o papel, não são atacados de maneira eficaz pelos micro-organismos. Na verdade, recuperar um jornal de 20 anos em condições de leitura não é totalmente impossível. Contudo, algumas condições anaeróbicas promovem atividades dos mesmos metanógenos usados na operação de digestores de lodos anaeróbicos para tratar esgotos (veja a página 786). O metano que eles produzem pode ser extraído por buracos perfurados e queimado para gerar eletricidade, ou purificado e introduzido em um sistema de canalização de gás natural (veja a Figura 28.15, página 807).



Figura 27.9 Biorremediação de um derramamento de óleo no Alasca. A porção da praia à esquerda não está limpa a praia à direita foi tratada com aplicações de nutrientes (fertilizantes) livres de carbono. Entretanto, abaixo das camadas superficiais, onde as condições são anaeróbicas, o óleo frequentemente permanece por períodos mais longos.

P A fórmula química da maioria dos produtos à base de petróleo contém nitrogênio ou fósforo? (Dica: Veja o quadro na página 33, Capítulo 2.)

Esses sistemas são parte de um projeto de muitos aterros grandes nos Estados Unidos, alguns dos quais fornecem energia para usinas e residências. Em uma escala menor, estudos na Índia mostraram que o metano produzido a partir dos resíduos de três vacas é suficiente para fornecer gás de cozinha para uma família.

A quantidade de matéria orgânica dos aterros pode ser consideravelmente reduzida se for primeiramente separada do material que não é biodegradável e compostado. A **compostagem** é um processo utilizado por jardineiros para converter resíduos de plantas em equivalente de húmus natural (Figura 27.10). Uma pilha de folhas ou feixes de grama é submetida à degradação microbiana. Sob condições favoráveis, bactérias termofílicas irão aumentar a temperatura do composto para 55 a 60°C em poucos dias. Depois que a temperatura diminuir, a pilha pode ser revirada para renovar o suprimento de oxigênio, e um segundo aumento de temperatura irá ocorrer. Ao longo do tempo, as populações microbianas termofílicas são substituídas pelas populações mesofílicas que continuam lentamente a conversão para o material estável semelhante ao húmus. Quando existe espaço disponível, resíduos municipais são compostados em fileiras (compridas, de pilhas pequenas) que são distribuídas e periodicamente reviradas por equipamentos específicos. A eliminação de resíduos municipais pelos métodos de compostagem tem sido cada vez mais realizada.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Por que os produtos do petróleo são naturalmente resistentes ao metabolismo pela maioria das bactérias? **27-11**
- ✓ Qual é a definição do termo *biorremediação*? **27-12**

Microbiologia aquática e tratamento de esgoto

OBJETIVOS DO APRENDIZADO

- 27-13** Descrever os habitats dos micro-organismos de água doce e marinhos.
- 27-14** Explicar como a poluição provocada pelas águas residuais é um problema de saúde pública e um problema ecológico.
- 27-15** Discutir as causas e os efeitos da eutrofização.
- 27-16** Explicar como a água é testada para a pureza bacteriológica.
- 27-17** Descrever como os patógenos são removidos da água potável.
- 27-18** Comparar os tratamentos primário, secundário e terciário de esgoto.
- 27-19** Listar algumas das atividades bioquímicas em um digestor de lodo anaeróbico.
- 27-20** Definir *demanda bioquímica de oxigênio (DBO)*, *sistema de lodo ativado*, *filtros biológicos*, *tanque séptico* e *lagoa de oxidação*.

Microbiologia aquática refere-se ao estudo dos micro-organismos e de suas atividades em águas naturais, como lagos, lagoas, córregos, rios, estuários e oceanos. Resíduos líquidos domésticos e industriais entram nos lagos e córregos, e sua degradação e efeitos na vida microbiana são fatores importantes na microbiologia aquática. Também veremos que o método de tratamento de águas residuais dos departamentos municipais mimetiza um processo natural de filtragem.

Micro-organismos aquáticos

Um grande número de micro-organismos em um corpo de água geralmente indica altos níveis de nutrientes na água. Água contaminada pelo influxo de sistemas de esgoto ou de resíduos orgânicos industriais biodegradáveis apresenta contagens bacterianas relativamente altas. De maneira similar, estuários oceânicos (alimentados por rios) têm altos níveis de nutrientes e, portanto, maiores populações microbianas em relação a outras águas costeiras.

Na água, principalmente com baixas concentrações de nutrientes, os micro-organismos tendem a crescer em superfícies paradas e em partículas. Dessa forma, um micro-organismo tem contato com mais nutrientes do que se estivesse aleatoriamente suspenso e flutuando livremente pela corrente. Muitas bactérias cujo principal habitat é a água frequentemente têm apêndices e ganchos que as prendem a superfícies variadas. Um exemplo é o *Caulobacter* (veja a Figura 11.2, página 304).

Microbiota de água doce

Uma lagoa ou lago típico serve como exemplo para representar as várias zonas e os tipos de microbiota encontrados em um corpo de água doce. A **zona litorânea** ao longo da margem tem considerável vegetação enraizada, e a luz penetra através dela. A **zona limnética** consiste na superfície de uma área de água aberta longe da costa. A **zona profunda** é a água mais profunda abaixo da zona limnética. A **zona bêntica** contém o sedimento no fundo.

Populações microbianas de corpos de água doce tendem a ser afetadas principalmente pela disponibilidade de oxigênio e luz. De várias maneiras, a luz é o recurso mais importante devido às al-



(a) Resíduos sólidos municipais sendo revirados por uma máquina especialmente projetada.



(b) Composto produzido a partir de resíduos municipais aguardando os caminhões para espalhá-lo em campos agrícolas.

Figura 27.10 Compostagem de resíduos municipais.

P Uma pilha de compostagem de grama e folhas é muito rica em carbono; ela tem muito nitrogênio?

gas fotossintéticas, que são a principal fonte de matéria orgânica, e consequentemente de energia, para o lago. Esses organismos são os produtores primários do lago que sustentam a população de bactérias, protozoários, peixes e outras vidas aquáticas. As algas fotossintéticas estão localizadas na zona limnética.

Áreas da zona limnética com oxigênio suficiente contêm espécies de pseudomonas e espécies de *Cytophaga*, *Caulobacter* e *Hyphomicrobium*. O oxigênio não se difunde muito bem na água, como qualquer dono de aquário sabe. Micro-organismos crescendo na água estagnada com nutrientes rapidamente utilizam-se do oxigênio dissolvido nela. Na água sem oxigênio, os peixes morrem e a atividade anaeróbica produz odores. A ação das ondas em camadas superficiais ou o movimento da água nos rios tende a aumentar a quantidade de oxigênio na água e auxilia no crescimento da população de bactérias aeróbicas. Portanto, o movimento melhora a qualidade da água e auxilia na degradação de nutrientes poluidores.

Águas mais profundas das zonas profundas e bênticas possuem baixas concentrações de oxigênio e menos luz. O crescimento de algas próximo à superfície com frequência filtra a luz, e não é raro que os micro-organismos fotossintéticos em zonas mais profundas utilizem diferentes comprimentos de onda de luz daqueles utilizados por fotossintetizadores da superfície (veja a Figura 12.10a, página 341).

As bactérias sulfurosas púrpuras e verdes são encontradas na zona profunda. Essas bactérias são organismos anaeróbicos fotossintéticos que metabolizam H_2S em enxofre e sulfato nos sedimentos do fundo da zona bêntica.

O sedimento na zona bêntica inclui bactérias como o *Desulfovibrio*, que utiliza o sulfato (SO_4^{2-}) comoceptor final de elétrons e o reduz a H_2S . As bactérias produtoras de metano também fazem parte dessas populações bênticas anaeróbicas. Em águas estagnadas, pântanos ou sedimentos de fundo, elas produzem gás metano. Espécies de *Clostridium* são comuns em sedimentos de fundo e podem incluir os organismos causadores do botulismo, particularmente aqueles causadores de surtos de botulismo em aves aquáticas.

Microbiota marinha

À medida que o conhecimento da vida microbiana dos oceanos aumenta, pela ampla identificação com o uso de métodos de RNA ribossomal (veja a discussão sobre FISH na página 292, Capítulo 10), os biólogos estão se tornando mais conscientes da importância dos micro-organismos marinhos. A conclusão até o momento é a de que aproximadamente um terço de toda a vida no planeta consista em micro-organismos que vivem não em águas oceânicas, mas no fundo do mar. Esses micro-organismos produzem grandes quantidades de gás metano, que pode causar danos ambientais se for liberado na atmosfera.

Na parte superior, onde a água do oceano é ensolarada, cianobactérias fotossintéticas do gênero *Synechococcus* e *Prochlorococcus* são abundantes. Populações de diferentes linhagens variam em diferentes profundidades de acordo com suas adaptações à luz solar disponível. Uma gota de água marinha contém 20.000 células de *Prochlorococcus*, uma esfera minúscula com menos de 0,7 μm de diâmetro. Essa população de micro-organismos microscópicos invisíveis preenche os 100 metros superiores do oceano e exerce grande influência na vida na Terra. O suporte para a vida oceânica depende completamente de tais vidas microscópicas fotossintéticas, do **fitoplâncton** marinho (um termo derivado do grego para plantas que são carregadas passivamente pelas correntes).

As bactérias fotossintéticas formam a base da cadeia alimentar oceânica. Bilhões delas em cada litro de água do mar dobram em número em poucos dias e são consumidas na mesma taxa por predadores microscópicos. Elas fixam dióxido de carbono para formar matéria orgânica, que eventualmente é liberada na forma dissolvida e utilizada por bactérias heterotróficas do oceano. Uma cianobactéria, *Trichodesmium*, fixa nitrogênio e auxilia na reposição do nitrogênio que é perdido pelos organismos que vivem no fundo do oceano. Populações imensas de outra bactéria, *Pelagibacter ubique*, metabolizam os produtos residuais dessas populações fotossintéticas (veja a discussão sobre Diversidade Microbiana na página 325). Bactérias de vários tipos tendem a servir



Figura 27.11 Bactéria bioluminescente como órgão de luz em peixes. Este é um peixe-lanterna das profundezas do mar (*Photoblepharon palpebratus*). Os órgãos luminosos sob os olhos podem ser cobertos pelo tecido da pálpebra.

P Que enzima é responsável pela bioluminescência?

como uma fonte particular de alimento para uma série de consumidores que aumenta cada vez mais. Esses consumidores são principalmente protozoários, os quais são alimento para o zooplâncton multicelular (vida animal planctônica, como o camarão *krill*).^{*} Esses zooplânctons eventualmente são fonte de alimento para peixes. A maior parte do dióxido de carbono e dos nutrientes minerais liberados pela atividade metabólica de bactéria, protozoário e zooplâncton é reciclada no fitoplâncton fotossintético.

Em águas abaixo de 100 metros, membros das arqueobactérias começam a dominar a vida microbiana. Membros planctônicos deste grupo do gênero *Crenarchaeota* aumentam a biomassa microbiana dos oceanos. Esses organismos são bem adaptados às temperaturas baixas e aos níveis baixos de oxigênio do fundo do oceano. O carbono desses organismos é basicamente derivado do CO₂ dissolvido.

A **bioluminescência** microbiana, ou emissão de luz, é um aspecto interessante da vida no fundo do oceano. Muitas bactérias são luminescentes e algumas estabelecem relações simbióticas com os peixes que habitam a zona bêntica. Esses peixes algumas vezes usam o brilho da sua bactéria residente para auxiliar na atração e na captura da presa na completa escuridão das profundezas do oceano (**Figura 27.11**). Esses organismos bioluminescentes têm uma enzima denominada *luciferase* que capta elétrons das flavoproteínas na cadeia de transporte de elétrons e então emite uma parte da energia dos elétrons como um fóton de luz (veja o quadro na página 780).

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Bactérias sulfurosas púrpuras e verdes são organismos fotossintéticos, mas elas geralmente são encontradas nas profundezas da água doce em vez de na superfície. Por quê? **27-13**

^{*} N. de T. *Krill* é um conjunto de espécies de animais invertebrados semelhantes ao camarão. Esses pequenos crustáceos são organismos importantes do zooplâncton.

Papel dos micro-organismos na qualidade da água

A água na natureza totalmente pura é rara. Até mesmo a água da chuva se contamina à medida que cai na Terra.

Poluição das águas

A forma de poluição da água que é nosso principal interesse é a poluição microbiana, especialmente por organismos patogênicos.

Transmissão de doenças infecciosas. A água que se move abaixo da superfície do solo passa por uma filtração que remove a maioria dos micro-organismos. Por essa razão, a água de fontes e poços profundos geralmente é de boa qualidade. A forma mais perigosa de poluição da água ocorre quando fezes entram no abastecimento de água. Muitas doenças são transmitidas pela via oral-fecal, em que um patógeno é disseminado por fezes humanas ou animais, contamina a água e é ingerido (veja o Capítulo 25). O Centro de Controle e Prevenção de Doenças (CDC) estima que, nos Estados Unidos, 900.000 pessoas fiquem doentes a cada ano por doenças transmitidas pela água. No mundo, estima-se que as doenças transmitidas pela água sejam responsáveis por mais de 2 milhões de mortes a cada ano, principalmente entre crianças com menos de cinco anos. Isso equivale a 20 acidentes com aviões jumbo por dia e representa aproximadamente 15% de todas as mortes de crianças nesta faixa etária.

Exemplos de tais doenças são a febre tifoide e a cólera, causadas por bactérias transmitidas somente por fezes humanas. Cerca de 100 anos atrás, o *Jornal da Associação Médica Americana* (*Journal of the American Medical Association*) publicou que a taxa de mortalidade por febre tifoide em Chicago havia diminuído de 159,7 por 100.000 pessoas em 1891 para 31,4 por 100.000 pessoas em 1894. Esse avanço na saúde pública foi alcançado pela extensão do sistema de encanamento coletor do abastecimento de água no Lago Michigan, para uma distância de aproximadamente 6,4 quilômetros da margem. De acordo com o jornal médico, tal medida diluiu a contaminação de esgoto do abastecimento de água, que não tinha sido tratado até então. O mesmo jornal especulou sobre a necessidade de remover micro-organismos que causavam doenças específicas, sugerindo o uso de leitos de filtros de areia, já amplamente utilizados na Europa naquela época. A filtração em areia é semelhante à purificação natural das fontes de água. A **Figura 27.12** ilustra o efeito da introdução dessa filtração em abastecimentos de água sobre a incidência de febre tifoide na Filadélfia.

Poluição química. A prevenção da contaminação química da água é um grande problema. Os produtos químicos industriais e agrícolas lixiviados da terra entram na água em grandes quantidades e em formas que são resistentes à biodegradação. As águas rurais muitas vezes têm quantidades excessivas de nitrato derivado de fertilizantes agrícolas. Quando ingerido, o nitrato é convertido em nitrito por bactérias no trato gastrointestinal. O nitrito compete por oxigênio no sangue e é muito prejudicial aos lactentes.

Um exemplo importante de poluição industrial de águas envolveu os resíduos líquidos de mercúrio da fabricação do papel. Permitiu-se que o mercúrio metálico fosse derramado em cursos de água como resíduo. Admitiu-se que o mercúrio era inerte e permaneceria separado nos sedimentos. Entretanto, as bactérias nos sedimentos convertiam o mercúrio em um composto químico solúvel,

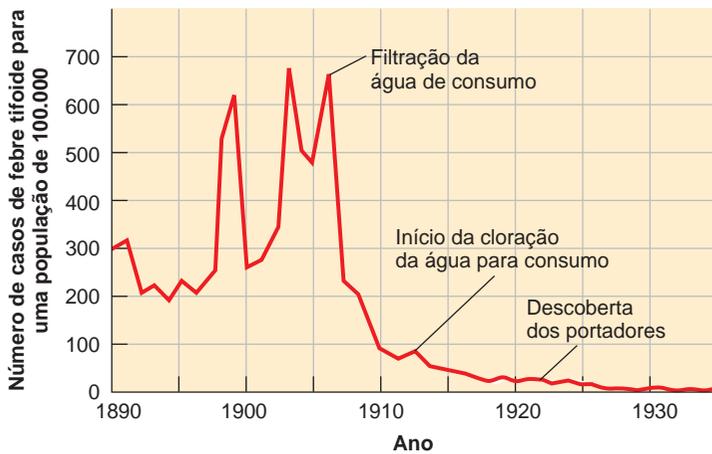


Figura 27.12 Incidência de febre tifoide na Filadélfia, 1890-1935. Este gráfico mostra claramente o efeito dos tratamentos de água sobre a incidência de febre tifoide.

Fonte: E. Steel, *Water Supply and Sewerage*, New York: McGraw-Hill, 1953.

P Por que a incidência de febre tifoide diminuiu?

o metil-mercúrio, que era consumido por peixes e invertebrados das águas. Quando peixes e mariscos são parte essencial da dieta humana, concentrações de mercúrio podem acumular-se com efeitos prejudiciais para o sistema nervoso. A Food and Drug Administration (FDA) aconselha que mulheres grávidas e lactantes não comam certos tipos de peixes, incluindo peixe-espada e tubarão, que são suscetíveis à contaminação com altos níveis de mercúrio. Esforços de biorremediação utilizando bactérias para detoxificar o mercúrio em um refúgio de vida selvagem são discutidos no quadro do Capítulo 2 (página 33).

Outro exemplo de poluição química são os detergentes sintéticos desenvolvidos logo após a Segunda Guerra Mundial. Eles rapidamente substituíram muitos dos sabões até então em uso. Como muitos desses detergentes não eram biodegradáveis, eles rapidamente se acumularam nos cursos de água. Em alguns rios, grandes porções de espuma podiam ser vistas flutuando corrente abaixo. Esses detergentes foram substituídos por formulações sintéticas biodegradáveis.

Entretanto, os detergentes biodegradáveis ainda representam um grande problema ambiental, pois muitas vezes contêm fosfatos. Infelizmente, os fosfatos quase não são alterados quando passam pelo sistema de tratamento de esgotos e podem levar à **eutrofização**, que é causada pelo excesso de nutrientes nos lagos e córregos.

Para compreender o conceito de eutrofização, recorde que as algas e as cianobactérias obtêm sua energia da luz solar e seu carbono do dióxido de carbono dissolvido na água. Na maioria das águas, somente os suprimentos de nitrogênio e fósforo, entretanto, permanecem inadequados para o crescimento de algas. Esses dois nutrientes podem ser introduzidos na água por meio de resíduos domésticos, agrícolas e industriais, quando o tratamento de resíduos é ausente ou ineficiente. Esses nutrientes adicionais causam um crescimento aquático denso denominado **crescimento excessivo de algas** (*algal blooms*). Como muitas cianobactérias podem



Figura 27.13 Uma maré vermelha. Estas proliferações excessivas aquáticas são causadas por excesso de nutrientes na água. A cor é da pigmentação dos dinoflagelados.

P Qual é a principal fonte de energia dos dinoflagelados que causa as proliferações aquáticas?

fixar o nitrogênio da atmosfera, esses organismos fotossintetizantes necessitam somente de traços de fósforo para iniciar essa proliferação. Uma vez que a eutrofização resulta no crescimento exagerado de algas ou cianobactérias, o efeito é o mesmo que a adição de matéria orgânica biodegradável. Em um curto prazo, essas algas e cianobactérias produzem oxigênio. Entretanto, elas eventualmente morrem e são degradadas por bactérias. Durante o processo de degradação, o oxigênio na água é esgotado, matando os peixes. Restos de matéria orgânica não degradada são depositados no fundo do lago e aceleram seu abastecimento.

As marés vermelhas do fitoplâncton produtoras de toxinas (**Figura 27.13**), mencionadas no Capítulo 12, são provavelmente causadas por nutrientes excessivos de correntes marítimas ou resíduos terrestres. Além dos efeitos da eutrofização, esse tipo de proliferação biológica pode afetar a saúde humana. Frutos do mar, especialmente mariscos ou moluscos semelhantes, que ingerem estes plânctons, tornam-se tóxicos aos seres humanos.

Resíduos municipais contendo detergentes são provavelmente a principal fonte de fosfatos de lagos e córregos. Como resultado, detergentes e fertilizantes para gramados que contenham fosfato são proibidos em muitos locais.

Resíduos da mineração de carvão, principalmente no leste dos Estados Unidos, possuem um alto conteúdo de enxofre, principalmente pirita (FeS_2). No processo de obtenção de energia a partir da oxidação de íon ferroso (Fe^{2+}), bactérias como *Thiobacillus ferrooxidans* convertem o FeS_2 em sulfato. O sulfato entra nos córregos como ácido sulfúrico, que diminui o pH da água e prejudica a vida aquática. O pH baixo também promove a formação de hidróxido de ferro insolúvel, que forma um precipitado amarelo, muitas vezes visto turvando as águas poluídas.

Testes de pureza das águas

Historicamente, a maior preocupação sobre a pureza das águas tem sido relacionada com a transmissão de doenças. Portanto, testes foram desenvolvidos para determinar a segurança das águas, muitos deles também sendo aplicáveis em alimentos.

Biossensores: bactérias que detectam poluentes e patógenos

A cada ano nos Estados Unidos, usinas geram 265 milhões de toneladas métricas de resíduos perigosos, 80% dos quais acabam em aterros. Enterrar essas substâncias químicas não as remove do ecossistema. Isso apenas as move para outros lugares, onde ainda podem ser encontradas em corpos de água. As análises químicas tradicionais para localizar as substâncias químicas apresentam um alto custo e não podem diferenciar aquelas que afetam os sistemas biológicos daquelas que são inertes ao ambiente.

Em resposta a esse problema, cientistas estão desenvolvendo biossensores, bactérias que podem localizar biologicamente poluentes ativos. Os biossensores não requerem substâncias químicas ou equipamentos de alto custo e trabalham rapidamente – em poucos minutos.

Para funcionar, os biossensores bacterianos requerem um receptor, que é ativado na presença de poluentes, e um marcador, que fará com que tal mudança seja aparente. Biossensores utilizam o operon *lux* de *Vibrio* ou *Photobacterium* como marcador. Este operon contém genes indutores e estruturais para a enzima luciferase. Na presença da coenzima FMN₂, a luciferase reage com a molécula de modo que o complexo enzima-substrato emite uma luz azul-esverdeada, o que então oxida o FMN₂ para produzir FMN. Portanto, uma bactéria contendo o operon *lux* irá emitir uma luz visível quando o receptor for ativado (veja as fotografias).

O operon *lux* é facilmente transferido para muitas bactérias. Cientistas em diversos países estão investigando o uso da *E. coli* contendo o operon *lux* para detectar produtos químicos

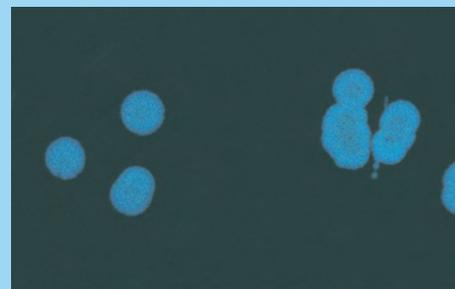
perigosos no solo e na água. Amostras de solo e água são colocadas em um tubo contendo a bactéria *E. coli* geneticamente modificada. A bactéria emitirá luz desde que esteja saudável, mas continuará emitindo luz mesmo tendo sido morta por poluentes tóxicos.

Em outras aplicações, a bactéria *Lactococcus* que possui o operon *lux* está sendo usada para detectar a presença de antibióticos no leite utilizado para a produção de queijo. Como a emissão de luz requer que a célula esteja viva, a presença de antibiótico é medida como uma diminuição na saída de luz pelo recombinante das bactérias *Lactococcus*.

Outros biossensores utilizam micro-organismos recombinantes transportando um gene de água-viva para a proteína fluorescente verde (*GFP*, de *green fluorescent protein*) e genes que são induzidos por poluentes ou antibióticos. Por exemplo, leveduras contendo genes que codificam receptores de odores em mamíferos e *GFP* irão fluorescer na presença de TNT. Depois que os poluentes são detectados, os processos de biorremediação são ainda necessários para removê-los.



(a)



(b)

Vibrio fischeri emite luz quando a energia é liberada pelo transporte de elétrons para a luciferase. Aqui são mostradas colônias de *V. fischeri* fotografadas (a) à luz do dia e (b) no escuro, iluminadas por sua própria luz.



Entretanto, não é prático procurar somente patógenos nos abastecimentos de água. Por um lado, se fossem encontrados os patógenos causadores de febre tifoide ou cólera no sistema de água, a descoberta já não poderia prevenir um surto da doença. Além disso, esses patógenos provavelmente estariam presentes so-

mente em pequeno número e poderiam não estar incluídos nas amostras testadas.

Os testes para pureza da água utilizados atualmente visam detectar **organismos indicadores** específicos. Existem vários critérios para um organismo indicador. O mais importante deles é que o or-

ganismo esteja efetivamente presente em fezes humanas em números substanciais, de modo que sua detecção seja uma boa indicação de que resíduos humanos estão sendo introduzidos na água. Os organismos indicadores a princípio também podem sobreviver na água tão bem quanto os patógenos. Esses organismos devem ser detectados por testes simples, que podem ser realizados por pessoas com pouco treinamento em microbiologia.

Nos Estados Unidos, os organismos indicadores habituais em água doce são as *bactérias coliformes*.^{*} **Coliformes** são definidos como bactérias aeróbicas ou anaeróbicas facultativas, gram-negativas, não formadoras de endosporos, do tipo bastonete, que fermentam lactose para formar gás 48 horas após terem sido colocadas em caldo lactosado a 35°C. Como alguns coliformes não são unicamente bactérias entéricas, mas são mais comumente encontrados em plantas e amostras de solo, muitos padrões para alimentos e água especificam a identificação de *coliformes fecais*. O coliforme fecal predominante é a *E. coli*, que constitui uma grande proporção da população bacteriana intestinal humana. Existem testes específicos para diferenciar coliformes fecais e coliformes não fecais. Note que os coliformes não são patogênicos por si mesmos sob condições normais, embora algumas linhagens possam causar diarreia (veja o Capítulo 25, página 717) e infecções oportunistas do trato urinário (veja o Capítulo 26, página 746).

Os métodos para determinação da presença de coliformes na água têm como base a habilidade das bactérias coliformes em fermentar lactose. O método dos tubos múltiplos pode ser utilizado para estimar o número de coliformes pelo método do número mais provável (MNP) (veja a Figura 6.19, página 177). O método de filtração em membrana é um método mais direto na determinação da presença e dos números de coliformes. Talvez seja o método mais amplamente usado na América do Norte e na Europa. Ele faz uso de um aparelho de filtração semelhante ao mostrado na Figura 7.4 (página 191). Nessa aplicação, porém, as bactérias coletadas na superfície de uma membrana filtrante removível são colocadas em um meio adequado e incubadas. As colônias de coliformes têm uma aparência distinta e são contadas. Esse método é adequado para águas com baixa turbidez, que não entopem o filtro e que têm relativamente poucas bactérias não coliformes que poderiam mascarar os resultados.

Um método mais novo e mais conveniente na detecção de coliformes, especificamente o coliforme fecal *E. coli*, faz uso de um meio contendo dois substratos, *o*-nitrofenil- β -D-galactopiranosídeo (ONPG) e 4-metilumbeliferil- β -D-glucuronídeo (MUG). Os coliformes produzem a enzima β -galactosidase, a qual atua sobre o ONPG e forma uma cor amarela, indicando a sua presença na amostra. *E. coli* é a única entre os coliformes que quase sempre produz a enzima β -glicoronidase, a qual atua sobre o MUG para formar um composto fluorescente que possui um brilho azul quando iluminado por uma luz ultra-

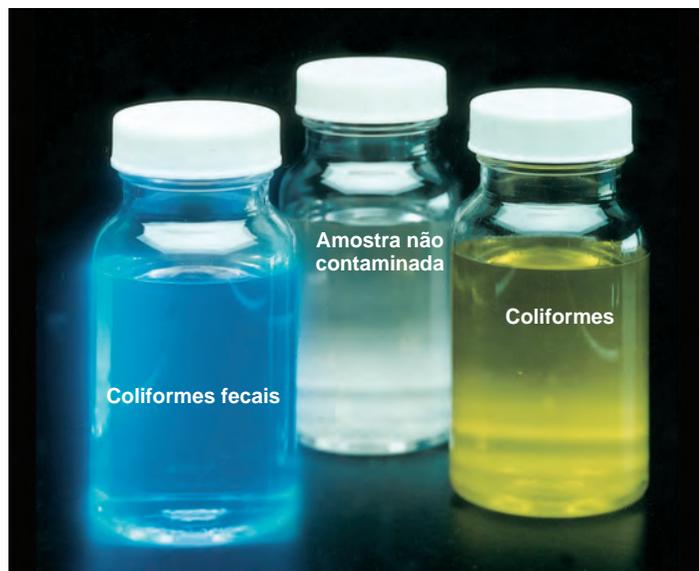


Figura 27.14 O teste ONPG e MUG para coliformes. A cor amarela (ONPG-positivo) indica a presença de coliformes. A fluorescência azul (MUG-positivo) indica a presença do coliforme fecal *E. coli*. O meio sem coloração indica uma amostra não contaminada.

P O que causa a formação de um composto fluorescente no teste positivo para MUG?

violeta (UV) de comprimento de onda longo (Figura 27.14). Esses testes simples, ou variações, podem detectar a presença ou a ausência de coliformes ou *E. coli* e podem ser combinados com o método dos tubos múltiplos para enumerá-los. Eles também podem ser aplicados em meios sólidos, como no método de filtração em membrana. As colônias fluorescem sob luz UV.

Os coliformes são organismos indicadores muito úteis na sanitização da água, porém têm limitações. Um dos problemas é o crescimento da bactéria coliforme incorporada em biofilmes nas superfícies internas das tubulações de água. Esses coliformes não representam contaminação externa fecal da água e não são considerados uma ameaça para a saúde pública. Normas que regem a presença de coliformes em águas para consumo requerem que qualquer amostra positiva seja relatada, e ocasionalmente esses coliformes nativos são detectados. Isso levou a orientações comunitárias desnecessárias para ferver a água.

Um problema mais sério é que alguns patógenos, especialmente vírus, cistos e oocistos de protozoários, são mais resistentes à desinfecção química do que os coliformes. Pelo uso de métodos sofisticados para a detecção de vírus, verificou-se que amostras de água quimicamente desinfetadas, livres de coliformes, muitas vezes estão contaminadas com vírus entéricos. Os cistos de *Giardia lamblia* e os oocistos de *Cryptosporidium* são tão resistentes à cloração que a eliminação completa deles por esse método é praticamente impossível; métodos mecânicos como a filtração são necessários. Uma regra geral para a cloração é que os vírus são mais resistentes ao tratamento do que a *E. coli*, e os cistos de *Cryptosporidium* e *Giardia* são 100 vezes mais resistentes que os vírus.

^{*} A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency – EPA) recomenda a utilização da bactéria *Enterococcus* como um indicador seguro para águas oceânicas e baías. Populações de enterococos diminuem mais uniformemente do que coliformes tanto em água doce quanto em água do mar.



Figura 27.15 As etapas envolvidas no tratamento de água em uma estação municipal típica de purificação de água.

P A remoção de “partículas coloidais” por flocação envolve organismos vivos?

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Qual doença é mais comum de ser transmitida por águas poluídas, cólera ou influenza? **27-14**
- ✓ Cite um micro-organismo que irá crescer na água, mesmo se não houver uma fonte de matéria orgânica para energia ou uma fonte de nitrogênio – mas que requer pequenas quantidades de fósforo. **27-15**
- ✓ Coliformes são os mais comuns indicadores bacterianos de poluição da água que ameaçam a saúde nos Estados Unidos. Por que normalmente é necessário especificar o termo *coliforme fecal*? **27-16**

Tratamento de água

Quando a água é obtida de reservatórios não contaminados alimentados por córregos de montanhas limpas ou por poços profundos, ela requer um mínimo de tratamento para ser segura para o consumo. Muitas cidades, contudo, obtêm suas águas de fontes bastante poluídas, como os rios que recebem os resíduos municipais e industriais. As etapas utilizadas para purificar essas águas são mostradas na **Figura 27.15**. O tratamento da água não está destinado a produzir água estéril, mas uma água livre de micro-organismos causadores de doenças.

Coagulação e filtração

Águas muito turvas (opacas) permanecem em um reservatório por um tempo, para permitir que a matéria particulada suspensa seja decantada. A água passa então pelo processo de **flocação**, com remoção de matéria orgânica coloidal como a argila, que é muito pequena (menor que 10 μm) e que de outra forma permaneceria em suspensão por tempo indeterminado. Um floculante químico,

como o sulfato de potássio e o alumínio (alúmen), forma agregados de partículas finas suspensas chamadas de *flocos*. À medida que esses agregados vão lentamente se depositando, eles capturam o material coloidal e o carregam até o fundo. Um grande número de vírus e bactérias também é removido dessa forma. O alúmen foi usado para limpar a água de rios lamacentos durante a primeira metade do século XIX nas fortalezas militares do oeste americano, muito antes que a teoria de doenças produzidas por germes fosse desenvolvida.

Depois da flocação, a água é tratada por **filtração** – isto é, passa através de leitos de 33 a 132 cm de areia fina ou carvão de antracito triturado. Como mencionado anteriormente, alguns cistos e oocistos de protozoários são removidos da água apenas por esse tratamento de filtração. Os micro-organismos são capturados principalmente por adsorção a superfícies de partículas de areia. Eles não penetram as rotas tortuosas entre as partículas, embora os espaços sejam maiores que os micro-organismos sendo filtrados. Esses filtros são periodicamente lavados para evitar acúmulos. Os sistemas de águas municipais têm uma grande preocupação com os suplementos químicos tóxicos de filtração de areia com filtros de carvão ativado (carbono). O carvão remove não somente matéria particulada, mas também a maioria dos poluentes químicos orgânicos dissolvidos. Uma estação de tratamento de água operando corretamente remove vírus (que são mais difíceis de remover do que bactérias e protozoários) com uma eficiência de cerca de 99,5%. Os *sistemas de filtração em membrana* em baixa pressão estão começando a ser utilizados. Esses sistemas possuem aberturas tão pequenas quanto 0,2 μm e são mais confiáveis para remover *Giardia* e *Cryptosporidium*.

Desinfecção

Antes de entrar no sistema de distribuição municipal, a água filtrada é clorada. Como a matéria orgânica neutraliza o cloro, os operadores da estação de tratamento devem prestar atenção constante para manter os níveis de cloro efetivos. Há certa preocupação de que o cloro em si possa ser prejudicial para a saúde, pois pode reagir com contaminantes orgânicos da água para formar compostos carcinogênicos. Atualmente, essa possibilidade é considerada um risco aceitável quando comparada à utilidade comprovada da cloração da água.

Como observado no Capítulo 7 (página 202), outro desinfetante para a água é o tratamento com ozônio. O ozônio (O_3) é uma forma altamente reativa do oxigênio que é formada por descarga elétrica e luz UV. (O odor fresco no ar depois de uma tempestade ou em uma lâmpada de luz ultravioleta é de ozônio.) Para o tratamento da água, o ozônio é produzido eletricamente no local do tratamento (Figura 27.16). O tratamento com ozônio também é válido por não deixar gosto nem odor. Uma vez que apresenta pouco efeito residual, o ozônio geralmente é utilizado como desinfetante no tratamento primário, seguido pela cloração. O uso da luz UV também é um suplemento ou uma alternativa para a desinfecção química. Lâmpadas de tubo UV são dispostas de modo que a água flua próximo a elas. Isso é necessário por causa do baixo poder de penetração da radiação UV.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ De que modo floculantes como o alumínio removem impurezas coloidais, incluindo micro-organismos, da água? 27-17

Tratamento de esgoto (águas residuais)

O esgoto, ou águas residuais, inclui toda a água de uso doméstico que é utilizada para lavagem e aquela de resíduos sanitários. A água da chuva que flui para os bueiros da rua e alguns resíduos industriais fazem parte do sistema de esgoto de muitas cidades. O esgoto é composto principalmente de água e contém pouca matéria particulada, talvez somente 0,03%. Mesmo assim, nas grandes cidades, a porção sólida do esgoto pode totalizar mais de 1.000 toneladas de material sólido por dia.

Até que a consciência ambiental se intensificasse, um número surpreendente de cidades norte-americanas tinha somente um sistema rudimentar de tratamento de esgoto ou não tinha qualquer sistema. O esgoto bruto, não tratado, era simplesmente descartado em rios ou oceanos. Uma corrente, com fluxo bastante aerado, é capaz de uma autopurificação considerável. Até que as populações em expansão e seus resíduos excedam essa capacidade, esse tratamento casual de resíduos municipais não é um problema. Nos Estados Unidos, a maioria dos casos de simples descarte foi melhorada, porém isso não ocorre na maior parte do mundo. Muitas comunidades que vivem às margens do Mediterrâneo depositam seus esgotos não tratados no mar. Em um resort turístico asiático, um hotel deu instruções para que não fosse dada descarga com papel higiênico no vaso sanitário – provavelmente porque o papel descartado flutuando deixaria claro que as saídas dos esgotos estavam perto da praia. Nas regiões da Europa e na África do Sul onde turistas são essenciais para a economia, a administração local tranquiliza



Figura 27.16 Geração de ozônio. As estações de tratamento de água produzem ozônio passando ar seco entre eletrodos de alta voltagem em tanques chamados de ozonizadores, como os dois mostrados aqui.

P Qual é a maior desvantagem da ozonização da água?

os visitantes sobre a qualidade da água com a campanha da Bandeira Azul. A presença da bandeira (Figura 27.17) mostra que a água costeira encontra determinados padrões mínimos de sanitização.

Tratamento primário do esgoto

A primeira etapa no tratamento de esgoto denomina-se **tratamento primário do esgoto** (Figura 27.18a). Nesse processo, grandes materiais flutuantes em águas residuais recebidas são filtrados, o esgoto flui através das câmaras de sedimentação para remover areia e materiais arenosos similares, escumadeiras removem óleo e graxas flutuantes, e os restos flutuantes são fragmentados e triturados. Depois dessa etapa, o esgoto passa através de tanques de sedimentação, onde a matéria sólida restante é sedimentada. Os sólidos do esgoto sedimentados no fundo são chamados de **lodo** – neste estágio, *lodo primário*. Aproximadamente 40 a 60% dos sólidos suspensos são removidos do esgoto por esse tratamento de sedimentação, e a floculação química, que aumenta a remoção de sólidos, algumas vezes é adicionada a essa etapa. A atividade biológica não é particularmente importante no tratamento primário, embora possa ocorrer digestão do lodo e da matéria orgânica dissolvida durante longos períodos de espera. O lodo é removido para uma base contínua ou intermitente, e o efluente (o líquido que sai) passa em seguida para o tratamento secundário.

Demanda bioquímica de oxigênio

Um conceito importante no tratamento de esgoto e na ecologia geral do gerenciamento de resíduos, a **demanda bioquímica de oxigênio (DBO)** é uma medida da matéria orgânica degradada biologicamente na água. O tratamento primário remove de 25 a 35% da DBO do esgoto.

A DBO é determinada pela quantidade de oxigênio necessária para a bactéria metabolizar a matéria orgânica. Na metodologia clássica, para determiná-la, são utilizadas garrafas com rolhas herméticas. Cada garrafa é primeiramente preenchida com a água a ser testada ou diluições. Inicialmente, a água é aerada para



Figura 27.17 Uma praia exibindo uma bandeira azul.

P Qual tipo de população bacteriana precisaria ser quantificado para estabelecer normas para as águas de praia de uma região?

fornecer uma quantidade relativamente alta de oxigênio dissolvido e, se necessário, semeada com bactérias. As garrafas cheias são incubadas por cinco dias no escuro a 20°C, e a diminuição do oxigênio dissolvido é determinada por um teste químico ou eletrônico. Quanto mais oxigênio é consumido pela bactéria para degradar a matéria orgânica na amostra, maior a DBO, a qual normalmente é expressa em miligramas de oxigênio por litro de água. A quantidade de oxigênio que normalmente pode ser dissolvida na água é de cerca de 10 mg/L; os valores de DBO típicos de águas residuais podem ser vinte vezes maiores que este valor. Se esta água residual for introduzida em um lago, por exemplo, a bactéria do lago começará a consumir a matéria orgânica responsável pela alta DBO, esgotando rapidamente o oxigênio da água do lago. (Veja a discussão anterior de eutrofização neste capítulo, página 779.)

Tratamento secundário do esgoto

Após o tratamento primário, a maior parte da DBO remanescente no esgoto está na forma de matéria orgânica dissolvida. O **tratamento secundário do esgoto**, predominantemente biológico, é projetado para remover a maior parte da matéria orgânica e reduzir a DBO (**Figura 27.18b**). Nesse processo, o esgoto passa por uma forte aeração para aumentar o crescimento de bactérias aeróbicas e outros micro-organismos que oxidam a matéria orgânica dissolvida a dióxido de carbono e água. Dois métodos comumente utilizados no tratamento secundário são o sistema de lodo ativado e os filtros biológicos.

Nos tanques de aeração de um **sistema de lodo ativado**, ar ou oxigênio puro passa através do efluente proveniente do tratamento primário (**Figura 27.19**). O nome é derivado da prática de se adicionar um pouco do lodo de um lote anterior ao esgoto que está entrando. Esse inóculo é denominado *lodo ativado*, pois contém grande número de micro-organismos que metabolizam o esgoto. A atividade desses micro-organismos aeróbicos oxida grande parte da matéria orgânica do esgoto em dióxido de carbono e água. Membros especialmente importantes da comunidade microbiana são as espécies de bactérias *Zoogloea*, as quais formam massas contendo bactérias nos tanques de aeração chamadas de flocos, ou *grânulos de lodo* (**Figura 27.20**). (Veja a discussão anterior sobre flocos neste capítulo.) A matéria orgânica solúvel no esgoto é incorporada ao floco e a seus micro-organismos. A aeração é interrompida após 4 a 8 horas, e os conteúdos do tanque são transferidos para um tanque de decantação, onde os flocos sedimentam, removendo grande parte da matéria orgânica. Esses sólidos são subsequentemente tratados em um digestor de lodo anaeróbico, que será descrito em breve. Provavelmente mais matéria orgânica é removida por esse processo de sedimentação do que pela oxidação aeróbica relativamente curta realizada por micro-organismos. O efluente clarificado é desinfetado e descarregado.

Ocasionalmente, o lodo pode flutuar em vez de sedimentar; esse fenômeno é denominado **intumescimento**. Quando isso ocorre, a matéria orgânica nos flocos flui com o efluente descartado, resultando em poluição local. O intumescimento é causado pelo crescimento de bactérias filamentosas de vários tipos; *Sphaerotilus natans* e espécies de *Nocardia* frequentemente infringem o processo. Os sistemas de lodo ativado são bastante eficientes, removendo 75 a 95% da DBO do esgoto.

Os **filtros biológicos** são outro método comumente usado no tratamento secundário. Nesse método, o esgoto é espalhado sobre um leito de pedras ou plásticos moldados (**Figura 27.21a**). Os componentes desse leito devem ser grandes o bastante para que o ar penetre até o fundo, mas pequenos o suficiente para maximizar a área de superfície disponível para a atividade microbiana. Um biofilme (veja a página 162) de micro-organismos aeróbicos cresce nas pedras ou nas superfícies plásticas (**Figura 27.21b**). Devido à circulação de ar através do leito de pedras, esses micro-organismos aeróbicos na camada limosa podem oxidar uma grande quantidade de matéria orgânica, escoando sobre as superfícies, em dióxido de carbono e água. Os filtros biológicos removem 80 a 85% da DBO, sendo assim menos eficientes do que os sistemas de lodo ativado. Entretanto, eles normalmente são menos problemáticos para operar e apresentam menos problemas de sobrecarga ou esgoto tóxico. Observe que o esgoto também é um produto do sistema de filtros biológicos.

Outro projeto baseado em biofilmes para o tratamento secundário do esgoto é o sistema **contactador biológico rotativo**. Esse sistema consiste em uma série de discos com vários centímetros de diâmetro, montados sobre um eixo. Os discos giram lentamente, com seus 40% inferiores submersos no resíduo líquido. A rotação fornece aeração e contato entre o biofilme dos discos e os resíduos líquidos. A rotação também tende a causar o desprendimento do biofilme acumulado, quando este se torna muito espesso. Isso equivale ao acúmulo de flocos nos sistemas de lodo ativado.

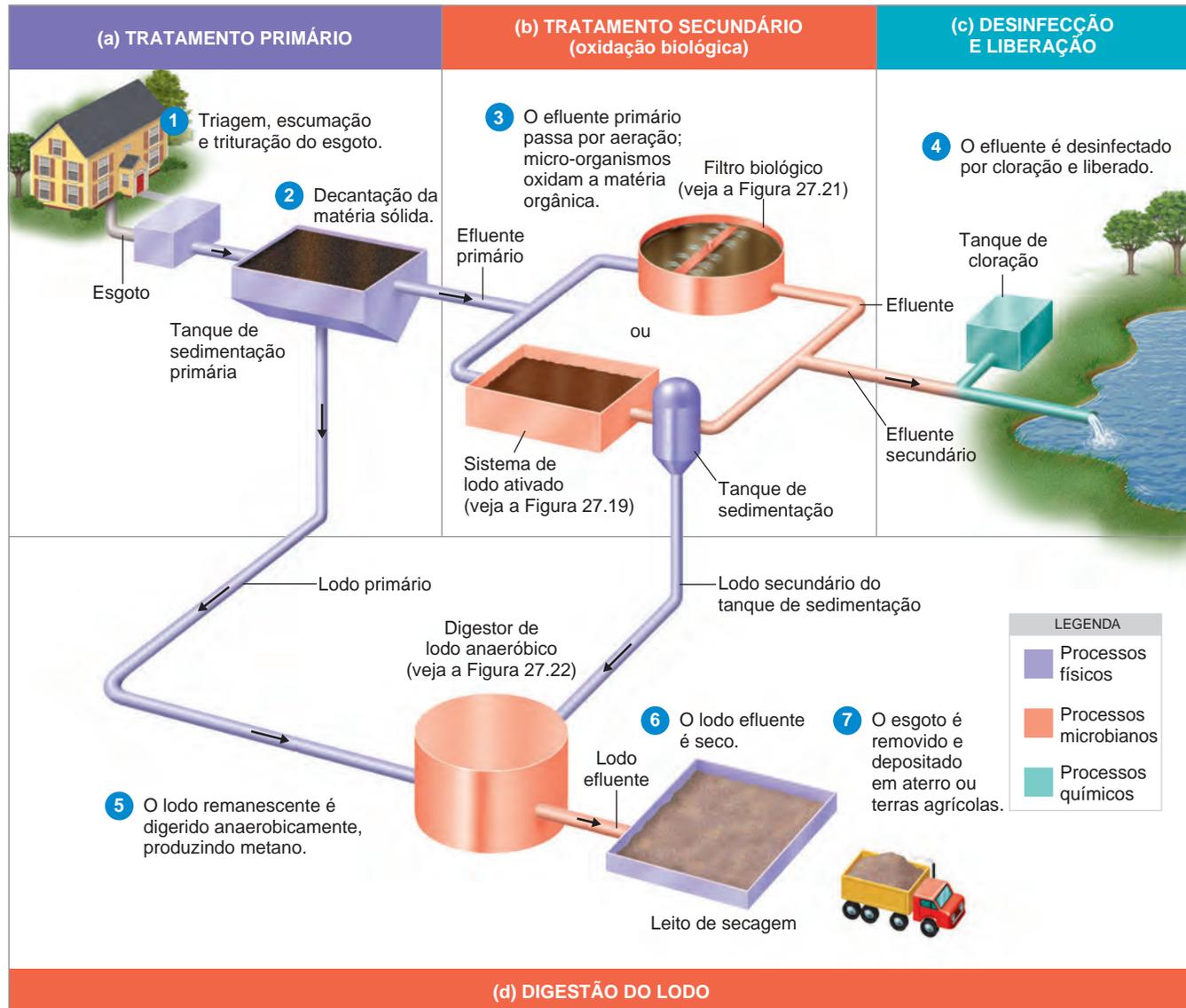


Figura 27.18 Os estágios de um tratamento de esgoto típico. A atividade microbiana ocorre aerobicamente em filtros biológicos ou em tanques de aerção de lodo ativado e anaerobicamente no digestor de lodo anaeróbico. Um sistema particular usaria tanques de aerção de lodo ativado ou filtros biológicos, não ambos, como mostrado nesta figura. O metano produzido pela digestão do lodo é queimado ou utilizado em aquecedores de energia ou motores de bombas.

P Qual processo requer oxigênio?

Desinfecção e liberação

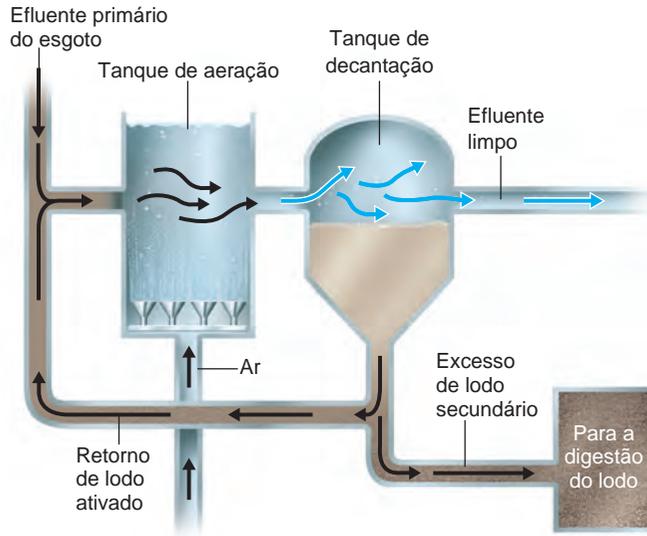
O esgoto tratado é desinfectado, geralmente por cloração, antes de ser liberado (Figura 27.18c). O descarte em geral é feito no oceano ou em córregos, embora os campos de irrigação por aspersão muitas vezes sejam utilizados para evitar a contaminação dos cursos de água por fósforo e metal pesado.

O esgoto pode ser tratado até um nível de purificação que permite seu uso como água para consumo. Essa prática é utilizada atualmente em algumas cidades em regiões semiáridas dos Estados Unidos e provavelmente será expandida. Em um sistema típico, o esgoto tratado é filtrado para remoção das partículas suspensas microscópicas, passando então através do sistema de purificação por

osmose reversa para remoção dos micro-organismos. Quaisquer micro-organismos remanescentes são mortos pela exposição à luz UV ou outros desinfetantes.

Digestão do lodo

O lodo primário acumula-se nos tanques de sedimentação primária; acumula-se também nos tratamentos secundários de lodo ativado e filtros biológicos. Para um tratamento posterior, esses lodos frequentemente são bombeados para **digestores de lodo anaeróbicos** (Figuras 27.18d e 27.22). O processo de digestão do lodo é realizado em grandes tanques dos quais o oxigênio é quase completamente excluído.



(a) Diagrama de um sistema de lodo ativado.



(b) Um tanque de aerção, mostrando a superfície espumando devido à aeração.

Figura 27.19 Sistema de lodo ativado de tratamento secundário de esgoto.

P Quais são as similaridades entre a fabricação de vinho e o tratamento de esgoto pelo sistema de lodo ativado?

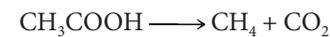
No tratamento secundário, enfatiza-se a manutenção das condições aeróbicas, de modo que a matéria orgânica é convertida em dióxido de carbono, água e sólidos que possam ser sedimentados. Um digestor anaeróbico de lodo, contudo, é projetado para favo-

recer o crescimento de bactérias anaeróbicas, especialmente bactérias produtoras de metano, que diminuem os sólidos orgânicos degradando-os em substâncias solúveis e gases, principalmente metano (60 a 70%) e dióxido de carbono (20 a 30%). O metano e o dióxido de carbono são produtos finais relativamente inócuos, em comparação com o dióxido de carbono e a água produzidos a partir do tratamento aeróbico. O metano é rotineiramente utilizado como combustível para o aquecimento do digestor e também gera energia para os equipamentos da estação de tratamento.

Existem essencialmente três estágios na atividade de um digestor de lodo anaeróbico. O primeiro estágio é a produção de dióxido de carbono e ácidos orgânicos a partir da fermentação anaeróbica do lodo por vários micro-organismos anaeróbicos e anaeróbicos facultativos. No segundo estágio, os ácidos orgânicos são metabolizados para formar hidrogênio e dióxido de carbono, bem como ácidos orgânicos como ácido acético. Esses produtos são matéria bruta para um terceiro estágio, no qual as bactérias produtoras de metano produzem o metano (CH_4). A maior parte do metano é proveniente da energia gerada pela redução do dióxido de carbono pelo gás hidrogênio:



Outros micro-organismos produtores de metano quebram o ácido acético (CH_3COOH) para produzir metano e dióxido de carbono:



Depois que a digestão anaeróbica está completa, grandes quantidades de lodo não digerido ainda permanecem, embora sejam relativamente estáveis e inertes. Para reduzir seu volume, esse lodo é bombeado para os leitos de secagem rasos ou os filtros de extração de água. Após essa etapa, o lodo pode ser utilizado para

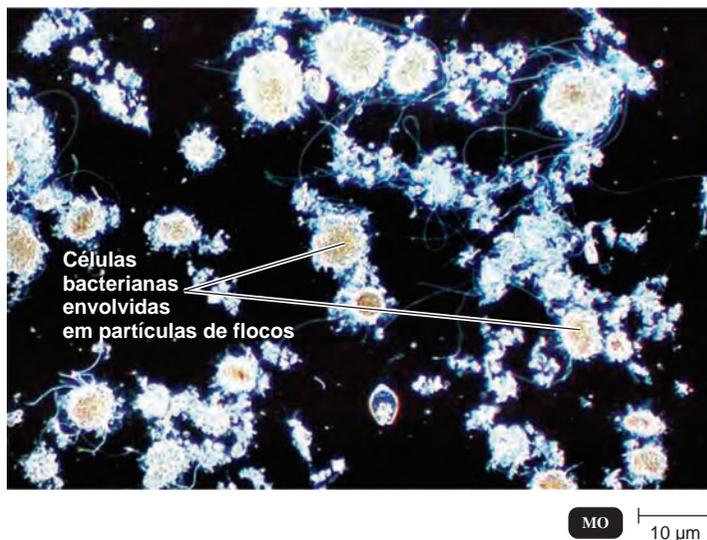
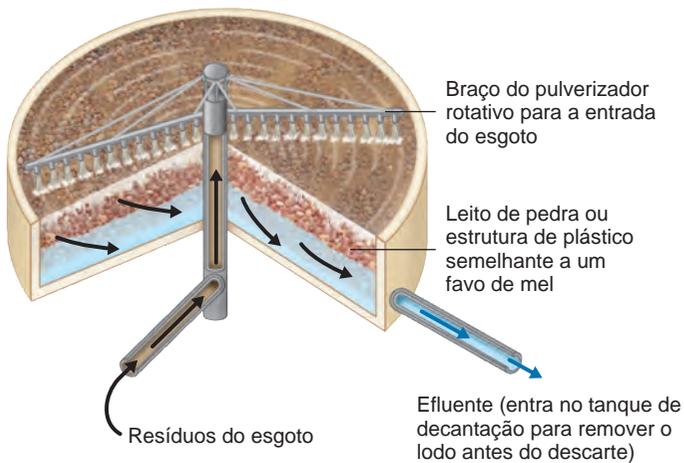


Figura 27.20 Flocos formados pelo sistema de lodo ativado. Massas gelatinosas de flocos são formadas por espécies de bactérias *Zoogloea*. Se as bactérias filamentosas visíveis na foto predominam, os flocos flutuam, o que é chamado de crescimento excessivo das bactérias filamentosas – o qual é indesejável.

P O que acontece ao flocos suspenso quando a aeração é finalizada em um tanque de lodo ativado?



(a) Braço do pulverizador rotativo de um sistema de filtro biológico.



(b) Uma vista interna de um sistema de filtro biológico.

Figura 27.21 Filtro biológico de um tratamento de esgoto secundário. O esgoto é aspergido por um sistema de canos rotativos sobre um leito de pedras ou uma estrutura de plástico semelhante a um favo de mel projetado para ter uma área de superfície máxima e para permitir a penetração profunda do oxigênio no leito.

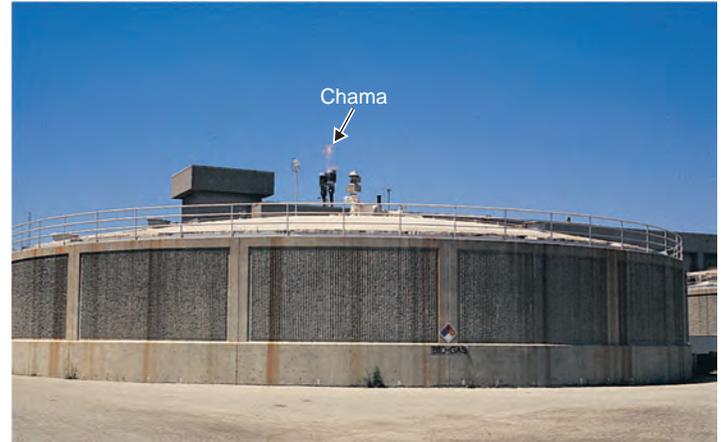
P O que tornaria mais eficiente o leito em um sistema de filtro biológico, areia fina ou bolas de golfe?

aterro ou como condicionador de solo, às vezes sob o nome de *biossólido*.

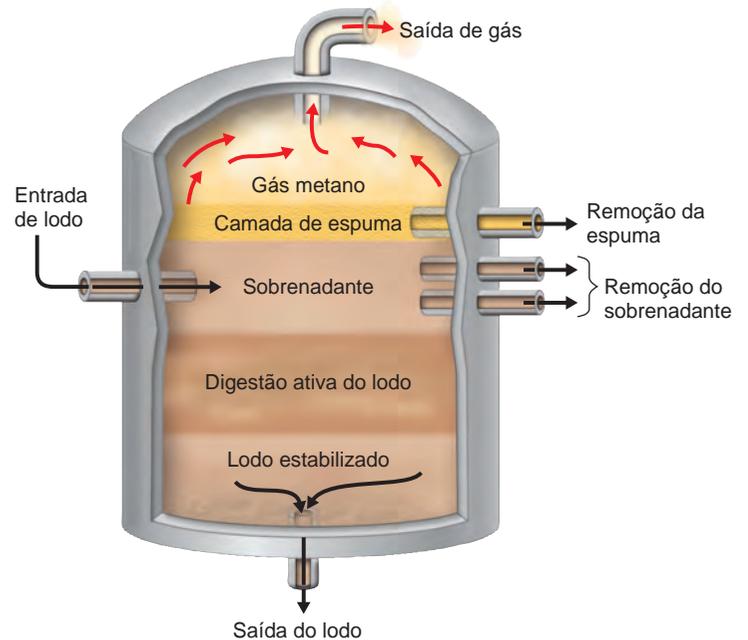
O lodo é dividido em duas classes: o lodo classe A não contém patógenos detectáveis, e o lodo classe B é tratado somente para reduzir o número de patógenos a certos níveis. A maioria do lodo é classe B, e o acesso público a sítios de aplicação é limitado. O lodo possui cerca de um quinto do valor dos fertilizantes de gramado comerciais normais, mas possui qualidades condicionadoras de solo desejáveis, tanto do húmus quanto da cobertura morta. Um problema potencial é a contaminação por metais pesados que são tóxicos às plantas.

Fossas sépticas

As casas e as empresas em áreas de baixa densidade populacional que não estejam conectadas ao sistema municipal de esgoto muitas vezes utilizam as **fossas sépticas**, um sistema cujo funciona-



(a) Um digestor de lodo anaeróbico em uma estação de tratamento de esgoto na Califórnia. Uma grande parte ou todo o digestor típico está abaixo do nível do solo, especialmente em climas frios. O metano do digestor muitas vezes é usado para o funcionamento de bombas ou aquecedores nas plantas de tratamento. O excesso de metano está sendo queimado na chama mostrada no topo do digestor.

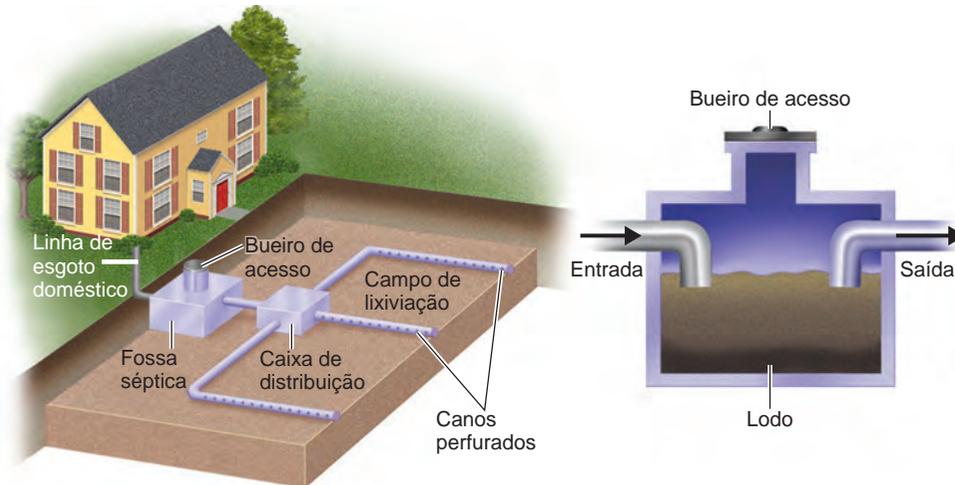


(b) Secção de um digestor de lodo. As camadas de espuma e de sobrenadante possuem poucos sólidos e são recirculadas pelo sistema de tratamento secundário.

Figura 27.22 Digestão de lodo.

P Quais seriam as formas de utilização do lodo estabilizado?

mento é semelhante ao princípio do tratamento primário (Figura 27.23). O esgoto entra em um tanque de retenção, e os sólidos suspensos são depositados no fundo. O lodo do tanque deve ser bombeado periodicamente e eliminado. O efluente flui através de um sistema de encanamento perfurado (drenagem do solo) para dentro de um campo de lixiviação. O efluente que entra no solo é decomposto por micro-organismos do solo. A ação microbiana necessária para o funcionamento adequado de um tanque séptico pode ser prejudicada pela quantidade excessiva de produtos como



(a) Um plano geral. A maioria da matéria orgânica solúvel é descartada por lixiviação no solo.

(b) Uma seção de uma fossa séptica.

Figura 27.23 Sistema de fossa séptica.

P Que tipo de solo poderia necessitar de uma maior área de drenagem, argiloso ou arenoso?

sabonetes antibacterianos, limpadores de ralos, medicamentos, produtos de limpeza para vaso sanitário provenientes da descarga e alvejantes.

Esses sistemas funcionam bem quando não são sobrecarregados e quando o sistema de drenagem possui o tamanho adequado para a carga e o tipo de solo. Solos com grandes quantidades de argila necessitam de um sistema de drenagem extensivo devido à fraca permeabilidade do solo. A alta porosidade de solos arenosos pode resultar na poluição química ou bacteriana de fontes de água próximas.

Lagoas de oxidação

Muitas indústrias e comunidades pequenas utilizam as **lagoas de oxidação**, também denominadas *lagoas* ou *tanques de estabilização*, para o tratamento de água. Elas têm um baixo custo de construção e funcionamento, mas necessitam de grandes áreas de terra. Os projetos variam, porém a maioria incorpora dois estágios. O primeiro é análogo ao tratamento primário; a lagoa de esgoto é profunda o suficiente para que as condições sejam quase inteiramente anaeróbicas. O lodo sedimenta nesse estágio. No segundo, que corresponde aproximadamente ao tratamento secundário; o efluente é bombeado para uma lagoa adjacente ou um sistema de lagoas rasas o suficiente para serem aeradas pela ação de ondas. Devido às dificuldades de manter as condições aeróbicas para o crescimento bacteriano nas lagoas com muita matéria orgânica, o crescimento de algas é favorecido para a produção de oxigênio. A ação das bactérias na decomposição da matéria orgânica dos resíduos gera dióxido de carbono. As algas, as quais utilizam dióxido de carbono em seu metabolismo fotossintético, crescem e produzem oxigênio, que por sua vez favorece a atividade de micro-organismos aeróbicos no esgoto. Grandes quantidades de matéria orgânica na forma de algas acumulam-se, mas isso não é um problema, pois a lagoa de oxidação, ao contrário de um lago, já possui uma grande carga de nutrientes.

Alguns pequenos sistemas de tratamento de esgoto, como aqueles de acampamentos isolados e áreas de lazer próximas a es-

tradas, utilizam um *fosso de oxidação* para tratamento de esgoto. Nesse método, um pequeno canal oval na forma de pista de corrida é preenchido com água de esgoto. Uma roda d'água semelhante a antigos barcos a vapor do Mississippi, porém em um local fixo, impulsiona a água em um fluxo aerado suficiente para oxidar os resíduos.

Tratamento terciário do esgoto

Como vimos, os tratamentos primário e secundário de esgoto não removem toda a matéria orgânica biologicamente degradável. Quantidades de matéria orgânica que não são excessivas podem ser liberadas em uma corrente de água sem causar sérios problemas. Eventualmente, entretanto, as pressões de uma população em crescimento podem aumentar os resíduos acima da capacidade de carregamento do corpo de água, e tratamentos adicionais poderão ser necessários. Até o momento, os tratamentos primário e secundário são inadequados em certas situações, como quando o efluente é descartado em pequenos córregos ou lagos recreacionais. Portanto, algumas comunidades desenvolveram estações de **tratamento terciário do esgoto**. O lago Tahoe nas Montanhas de Serra Nevada, cercado por desenvolvimento extensivo, é o local com sistema de tratamento terciário de esgoto mais conhecido. Sistemas similares são utilizados para tratar resíduos que entram na porção sul da baía de São Francisco.

O efluente de uma estação de tratamento secundário contém somente DBO residual. Ele também contém aproximadamente 50% do nitrogênio original e 70% do fósforo original, que podem afetar bastante o ecossistema do lago. O tratamento terciário é requerido para remover essencialmente toda a DBO, o nitrogênio e o fósforo. O tratamento terciário depende menos do tratamento biológico do que dos tratamentos físicos e químicos. O fósforo é precipitado pela combinação com produtos químicos como cal, alumínio e cloreto férrico. Filtros de areias finas e carvão ativado removem pequenos materiais particulados e produtos químicos dissolvidos. O nitrogênio é convertido em amônia e liberado no ar por torres de remoção. Alguns sistemas favorecem as bactérias

desnitrificantes para a formação de gás nitrogênio volátil. Finalmente, a água purificada é clorada.

O tratamento terciário fornece água própria para consumo, porém o processo é extremamente caro. O tratamento secundário é mais barato, porém a água que passa somente por esse tratamento contém muitos poluentes. Muitos trabalhos vêm sendo realizados para projetar estações de tratamento secundário nas quais o efluente possa ser utilizado para irrigação. Esse projeto poderia eliminar a fonte de poluição da água, fornecendo nutrientes para o crescimento de plantas, e reduzir a demanda dos suprimentos de água já escassos. O solo no qual a água fosse usada poderia atuar como um filtro biológico para remover produtos químicos e micro-organismos antes que a água alcançasse os suprimentos subterrâneos e da superfície.

TESTE SEU CONHECIMENTO

- ✓ Que tipo de tratamento é apropriado para remover quase todo o fósforo do esgoto? **27-18**
- ✓ Que grupo metabólico de bactérias anaeróbicas é especialmente favorecido pela operação dos sistemas de digestão de lodo? **27-19**
- ✓ Qual é a relação entre DBO e as condições de vida dos peixes? **27-20**

* * *

Esperamos que este capítulo em microbiologia ambiental, assim como os capítulos anteriores do livro, tenham deixado você com um grande apreço em relação à influência dos micro-organismos ao nosso redor. Sem as aplicações naturais dos micro-organismos e as direcionadas pelo homem, a vida poderia ser bem diferente – e talvez não pudesse se manter.

RESUMO PARA ESTUDO

Diversidade microbiana e habitats (p. 767)

1. Os micro-organismos vivem em uma ampla variedade de habitats por causa da sua diversidade metabólica e sua capacidade de utilizar uma variedade de fontes de carbono e energia e crescer sob diferentes condições físicas.
2. Os extremófilos vivem em condições extremas de temperatura, acidez, alcalinidade ou salinidade.

Simbiose (p. 767)

3. A simbiose é uma relação entre dois organismos ou populações diferentes.
4. Fungos simbióticos denominados micorrizas vivem dentro e sobre as raízes de plantas; eles aumentam a área de superfície e a absorção de nutrientes da planta.



Microbiologia do solo e ciclos biogeoquímicos (p. 768-776)

1. Nos ciclos biogeoquímicos, determinados elementos são reciclados.
2. Micro-organismos no solo decompõem matéria orgânica e transformam compostos contendo carbono, nitrogênio e enxofre em formas utilizáveis.
3. Os micro-organismos são essenciais na continuidade dos ciclos biogeoquímicos.
4. Os elementos são oxidados e reduzidos pelos micro-organismos durante esses ciclos.

Ciclo do carbono (p. 768-770)

5. O dióxido de carbono é incorporado ou fixado a componentes orgânicos pelos fotoautotróficos e quimioautotróficos.
6. Esses compostos orgânicos fornecem nutrientes para os quimio-heterotróficos.
7. Os quimio-heterotróficos liberam CO_2 , que é então utilizado pelos fotoautotróficos.
8. O carbono é removido do ciclo quando está no CaCO_3 e em combustíveis fósseis.

Ciclo do nitrogênio (p. 770-772)

9. Os micro-organismos decompõem proteínas de células mortas e liberam os aminoácidos.
10. A amônia é liberada pela amonificação microbiana dos aminoácidos.
11. O nitrogênio na amônia é oxidado para produzir nitratos pelas bactérias nitrificantes, para energia.
12. As bactérias desnitrificantes reduzem o nitrogênio dos nitratos a nitrogênio molecular (N_2).
13. O N_2 é convertido em amônia pelas bactérias fixadoras de nitrogênio.
14. Bactérias fixadoras de nitrogênio incluem os gêneros de vida livre como *Azotobacter*, cianobactérias e as bactérias simbióticas *Rhizobium* e *Frankia*.
15. A amônia e o nitrato são utilizados pelas bactérias e plantas para sintetizar aminoácidos que formam as proteínas.



Ciclo do enxofre (p. 772, 773)

16. O sulfeto de hidrogênio (H_2S) é utilizado pelas bactérias autotróficas; o enxofre é oxidado para formar S^0 ou SO_4^{2-} .
17. As plantas e outros micro-organismos podem reduzir SO_4^{2-} para produzir certos aminoácidos. Esses aminoácidos são, por sua vez, utilizados pelos animais.
18. O H_2S é liberado pela deterioração ou dissimilação desses aminoácidos.

Vida sem a luz solar (p. 773, 774)

19. Os quimioautotróficos são os produtores primários em orifícios do fundo do mar e dentro de rochas profundas.

Ciclo do fósforo (p. 774)

20. O fósforo (como PO_4^{3-}) é encontrado em rochas e guano de aves.
21. Quando solubilizado por ácidos microbianos, o PO_4^{3-} está disponível para plantas e micro-organismos.
22. As bactérias endolíticas vivem em rochas sólidas; essas bactérias autotróficas utilizam hidrogênio como fonte de energia.

Degradação de produtos químicos sintéticos no solo e na água (p. 775, 776)

23. Muitos produtos químicos sintéticos, como os pesticidas, são resistentes à degradação pelos micro-organismos.
24. O uso de micro-organismos para remover poluentes é denominado biorremediação.
25. O crescimento de bactérias degradadoras de óleo pode ser aumentado pela adição de fertilizantes de nitrogênio e fósforo.
26. Aterros de lixo municipais previnem a decomposição de resíduos sólidos por serem secos e anaeróbicos.
27. Em alguns aterros, o metano produzido pelos metanógenos pode ser recuperado como fonte de energia.
28. A compostagem pode ser utilizada para promover a biodegradação de matéria orgânica.

Microbiologia aquática e tratamento de esgoto (p. 776-789)

Micro-organismos aquáticos (p. 776-778)

1. O estudo dos micro-organismos e sua atividade em águas naturais é chamado de microbiologia aquática.
2. Águas naturais incluem lagos, lagoas, córregos, rios, estuários e oceanos.
3. A concentração de bactérias na água é proporcional à quantidade de matéria orgânica na água.
4. A maioria das bactérias aquáticas tende a crescer em superfícies em vez de ser flutuante livre.
5. A quantidade e a localização da microbiota de água doce dependem da disponibilidade de oxigênio e luz.
6. As algas fotossintéticas são os principais produtores de um lago; elas são encontradas em zonas limnéticas.
7. *Pseudomonas*, *Cytophaga*, *Caulobacter* e *Hyphomicrobium* são encontrados na zona limnética, onde o oxigênio é abundante.
8. Micro-organismos em águas estagnadas utilizam o oxigênio disponível e podem causar odores e morte aos peixes.
9. A ação das ondas aumenta a quantidade de oxigênio dissolvido.
10. Bactérias sulfurosas púrpuras e verdes são encontradas em zonas profundas, que contêm luz e H_2S , porém sem oxigênio.
11. O *Desulfovibrio* reduz o SO_4^{2-} a H_2S na lama bêntica.
12. Bactérias produtoras de metano também são encontradas na zona bêntica.
13. O fitoplâncton é o principal produtor do oceano aberto.
14. *Pelagibacter ubique* é um decompositor nas águas oceânicas.
15. As arqueobactérias predominam abaixo de 100 m.
16. Algumas algas e bactérias são bioluminescentes. Elas possuem a enzima luciferase, que pode emitir luz.

Papel dos micro-organismos na qualidade da água (p. 778-782)

17. Os micro-organismos são filtrados da água que é lixiviada em suprimentos subterrâneos.
18. Alguns micro-organismos patogênicos são transmitidos para os seres humanos através de águas recreacionais e de consumo.
19. Os poluentes químicos resistentes podem estar concentrados em animais na cadeia alimentar aquática.

20. O mercúrio é metabolizado por algumas bactérias em um composto solúvel que é concentrado nos animais.
21. Nutrientes como os fosfatos causam o crescimento acelerado das algas, o que leva à eutrofização dos ecossistemas aquáticos.
22. Eutrofização é o resultado da adição de poluentes ou nutrientes naturais.
23. *Thiobacillus ferrooxidans* produz ácido sulfúrico em locais de mineração de carvão.
24. Os testes para a qualidade bacteriológica da água tem como base a presença de organismos indicadores, sendo os coliformes os mais comuns.
25. Coliformes são bastonetes aeróbicos ou anaeróbicos facultativos, gram-negativos, não formadores de endosporos, que fermentam a lactose com a produção de gás 48 horas após serem colocados no meio a 35°C.
26. Coliformes fecais, predominantemente *E. coli*, são utilizados para indicar a presença de fezes humanas.



Tratamento de água (p. 782, 783)

27. Águas para consumo são mantidas em reservatórios o tempo suficiente para que o material suspenso decante.
28. O tratamento por floculação utiliza substâncias químicas como o alumínio para agregar e assentar o material coloidal.
29. A filtração remove cistos de protozoários e outros micro-organismos.
30. A água para consumo é desinfetada com cloro para matar as bactérias patogênicas remanescentes.

Tratamento de esgoto

(águas residuais) (p. 783-789)

31. O resíduo líquido doméstico é denominado esgoto; ele inclui água de uso doméstico, resíduos sanitários e pluviais.
32. O tratamento primário do esgoto é a remoção de matéria orgânica denominada lodo.
33. A atividade biológica não é muito importante no tratamento primário.
34. A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é a medida da matéria orgânica biologicamente degradável na água.
35. O tratamento primário remove em torno de 25 a 35% da DBO do esgoto.
36. A DBO é determinada pela medida da quantidade de oxigênio necessária para degradar a matéria orgânica.
37. O tratamento secundário do esgoto é a degradação biológica de matéria orgânica após o tratamento primário.
38. Os sistemas de lodo ativado, filtros biológicos e contactores biológicos rotativos são métodos de tratamento secundário.
39. Os micro-organismos degradam a matéria orgânica aerobicamente.
40. O tratamento secundário remove até 95% da DBO.
41. O esgoto tratado é desinfetado, normalmente por cloração, antes de ser liberado no solo ou na água.
42. O lodo é colocado no digestor de lodo anaeróbico; as bactérias degradam a matéria orgânica e produzem compostos orgânicos simples, metano e CO_2 .
43. O metano produzido no digestor é utilizado para aquecê-lo e operar outros equipamentos.

- 44. O excesso de lodo é periodicamente removido do digestor, seco e jogado fora (como aterro ou condicionador de solo) ou incinerado.
- 45. As fossas sépticas podem ser utilizadas em áreas rurais para o tratamento primário do esgoto.
- 46. Comunidades pequenas podem usar lagoas de oxidação para o tratamento secundário.

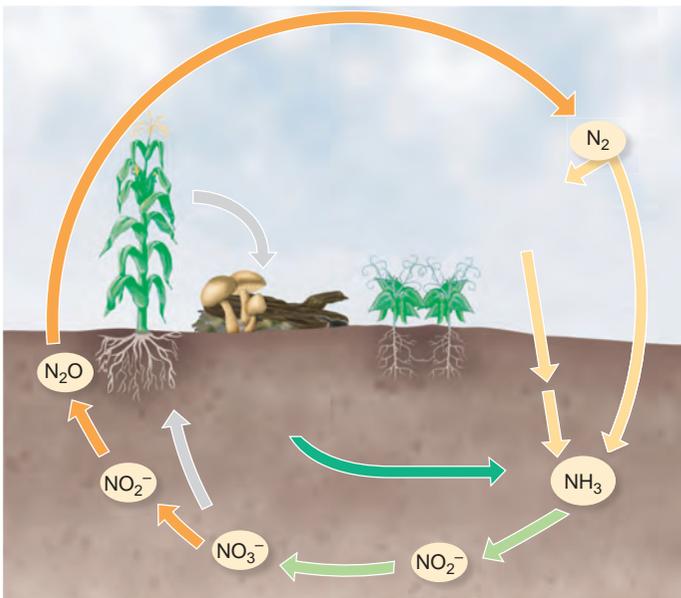
- 47. Elas necessitam de uma área grande para a construção de um lago artificial.
- 48. O tratamento terciário do esgoto utiliza filtração física e precipitação química para remover toda a DBO, o nitrogênio e o fósforo da água.
- 49. O tratamento terciário fornece água para consumo, enquanto o tratamento secundário fornece somente água para irrigação.

QUESTÕES PARA ESTUDO

As respostas para as questões de revisão e múltipla escolha podem ser encontradas na seção *Respostas* deste livro.

Revisão

1. O coala é um animal que se alimenta de folhas. O que você pode constatar sobre seu sistema digestório?
2. Dê uma explicação possível para a produção de penicilina pelo *Penicillium*, uma vez que os fungos não desenvolvem infecções bacterianas.
3. No ciclo do enxofre, os micro-organismos degradam compostos orgânicos sulfurosos, como (a) _____, para liberar H₂S, que pode ser oxidado por *Thiobacillus* em (b) _____. Esse íon pode ser assimilado em aminoácidos por (c) _____ ou reduzido por *Desulfovibrio* em (d) _____. O H₂S é utilizado por bactérias fotoautotróficas como um doador de elétrons para sintetizar (e) _____. O subproduto contendo enxofre desse metabolismo é (f) _____.
4. Por que o ciclo do fósforo é importante?
5. **DESENHE** Identifique onde os seguintes processos ocorrem: amonificação, decomposição, desnitrificação, nitrificação, fixação do nitrogênio. Cite pelo menos um micro-organismo responsável por cada processo.



6. Os organismos a seguir possuem um papel importante como simbiotes com plantas e fungos; descreva a relação simbiótica de cada organismo com o seu hospedeiro: cianobactérias, micorrizas, *Rhizobium*, *Frankia*.

7. Faça um resumo do processo de tratamento de água para consumo.
8. Os processos a seguir são utilizados no tratamento de águas residuais. Associe o estágio do tratamento com os processos. Cada opção pode ser usada uma vez, mais de uma vez ou não ser usada.

Processos	Estágios do tratamento
_____ a. Campo de lixiviação	1. Primário
_____ b. Remoção de sólidos	2. Secundário
_____ c. Degradação biológica	3. Terciário
_____ d. Sistema de lodo ativado	
_____ e. Precipitação química de fósforo	
_____ f. Filtro biológico	
_____ g. Resultados na água de consumo	

9. Biorremediação refere-se ao uso de micro-organismos vivos para a remoção de poluentes. Descreva três exemplos de biorremediação.

Múltipla escolha

Para as questões de 1 a 4, responda se

- a. o processo ocorre sob condições aeróbicas.
- b. o processo ocorre sob condições anaeróbicas.
- c. a quantidade de oxigênio não faz qualquer diferença.

1. Sistema de lodo ativado.
2. Desnitrificação.
3. Fixação de nitrogênio.
4. Produção de metano.
5. A água utilizada para preparar soluções intravenosas em um hospital contém endotoxinas. O responsável pelo controle de infecções realiza contagens em placa para encontrar a fonte das bactérias. Os resultados são os seguintes:

	Bactérias/100 mL
Encanamento municipal de água	0
Caldeira	0
Linha de água quente	300

Todas as conclusões seguintes sobre as bactérias podem ser verdadeiras, exceto qual?

- a. Elas estavam presentes como um biofilme nos canos.
- b. Elas são gram-negativas.
- c. Elas são resultantes da contaminação fecal.
- d. Elas são resultantes do abastecimento de água da cidade.
- e. Nenhuma das alternativas.

