



As águas do

planeta Terra

Marco Tadeu Grassi

Um dos principais desafios mundiais na atualidade é o atendimento à demanda por água de boa qualidade. O crescimento populacional, a necessidade de produção de alimentos e o desenvolvimento industrial devem gerar sérios problemas no abastecimento de água nos próximos anos. Este texto trata da importância da água para a sobrevivência do homem e de toda a biota terrestre. Apresentam-se algumas das propriedades mais importantes da água e sua distribuição em nosso planeta. Descrevem-se as formas de uso deste recurso, assim como as principais fontes de poluição e finalmente discute-se a importância do tratamento da água na melhoria da qualidade de vida da população mundial.

► padrões de qualidade da água, potabilidade, poluição, tratamento da água ◀

A água é um recurso fundamental para a existência da vida, na forma que nós conhecemos. Foi na água que a vida floresceu, e seria difícil imaginar a existência de qualquer forma de vida na ausência deste recurso vital. Nosso planeta está inundado d'água; um volume de aproximadamente 1,4 bilhão de km³ cobre cerca de 71% da superfície da Terra. Apesar disso, muitas localidades ainda não têm acesso a quantidades de água com características de potabilidade adequadas às necessidades do consumo humano.

A água tem sido um bem de extrema importância para o homem desde a descoberta de que a produção de alimentos dependia da oferta de água usada no cultivo. As cidades que se desenvolveram no antigo Egito, após a revolução agrícola que ocorreu cerca de 5.000 anos antes de Cristo, o fizeram próximas a rios que atendessem a suas demandas domésticas e agrícolas. Posteriormente, a água corrente também passou a ser utilizada na movimentação de máquinas que cortavam madeira, em moinhos de grãos e finalmente em processos industriais.

A grande oferta fez da água a substância ideal para ser empregada

como solvente universal na limpeza e transporte de praticamente todos os resíduos gerados pelo homem. Ao redor de todo o mundo, as cidades foram se estabelecendo e crescendo próximas a grandes cursos d'água. Até os dias atuais, após seu uso nas mais diversas atividades, a água ainda é geralmente descartada para o corpo receptor mais próximo, muitas vezes sem que passe por qualquer tipo de tratamento. Não obstante, é verdadeiro afirmar que o baixo custo associado ao uso de enormes quantidades de água tem sido um dos pilares do desenvolvimento de nossa sociedade.

Algumas propriedades da água

A água é, certamente, a espécie química mais abundante na Terra. É, além disso, uma substância que pode ser encontrada, naturalmente, em todos os três estados físicos: sólido (gelo), líquido (água líquida) e gasoso (vapor). Sua capacidade em conduzir e estocar o calor (condutividade térmica e capacidade calorífica) também é única. Entre outros aspectos, a água tem um elevado calor de evaporação. Enquanto são necessários 0,239 J (1 caloria) para se elevar a temperatura de 1 g de água de 1 °C, esta mesma massa de água exige

Água e população mundial

A água potável de boa qualidade é fundamental para a saúde e o bem-estar humano. Entretanto, a maioria da população mundial ainda não tem acesso a este bem essencial. Mais do que isto, existem estudos que apontam para uma escassez cada vez mais acentuada de água para a produção de alimentos, desenvolvimento econômico e proteção de ecossistemas naturais. Para exercer tais atividades, especialistas estimam que o consumo mínimo de água per capita deva ser de pelo menos 1000 m³ por ano. Cerca de 26 países, em sua maioria localizados no continente africano, já se encontram abaixo deste valor. Com o rápido crescimento populacional, acredita-se que inúmeras outras localidades deverão atingir esta categoria no futuro próximo. Várias regiões do planeta (Pequim, Cidade do México, Nova Deli e Recife, no Brasil) estão acima desse valor apenas devido à exploração de águas subterrâneas (Nebel e Wright, 2000).

Tabela 1: Propriedades físicas de alguns hidretos simples.

Substância	CH ₄	NH ₃	H ₂ O	HF	H ₂ S
Ponto de fusão, °C	-182	-78	0	-83	-86
Ponto de ebulição, °C	-164	-33	+100	+19	-61

cerca de 540 vezes mais energia para se evaporar (Masterton *et al.*, 1990).

Comparativamente com outros hidretos, observa-se que a água apresenta temperaturas de fusão e ebulição bem mais elevadas, conforme mostra a Tabela 1. Estas características são bastante importantes para a existência de vida na Terra, uma vez que a forma líquida é o estado físico predominante (Bunce, 1993).

Uma outra propriedade da água, pouco usual, porém igualmente importante, é que a forma líquida apresenta uma densidade maior que a forma sólida. Se o contrário fosse verdade, durante o inverno as águas de inúmeros rios e lagos localizados no hemisfério norte de nosso planeta, ao se congelarem, se depositariam no fundo dos mesmos. Sob estas condições, provavelmente não se fundiriam novamente no verão. Assim sendo, a mistura que ocorre na primavera e outono desempenha um papel importante na recirculação de nutrientes. Esta mistura só ocorre porque a água tem sua densidade máxima a 4 °C. Durante o outono, quando as temperaturas das águas de inúmeros lagos cai para valores próximos a 4 °C, as águas superficiais se tornam mais densas que as águas mais profundas e assim se deslocam para o fundo, misturando as espécies dissolvidas, num movimento vertical.

Distribuição da água na Terra

Tabela 2: Distribuição da água em nosso planeta.

Reservatórios	Volume, km ³	Percentual, %
Oceanos	1.320.305.000	97,24
Geleiras e calotas polares	29.155.000	2,14
Águas subterrâneas	8.330.000	0,61
Lagos	124.950	0,009
Mares	104.125	0,008
Umidade do solo	66.640	0,005
Atmosfera	12.911	0,001
Rios	1.250	0,0001
Total	1.358.099.876	100

Toda a biota, assim como a maior parte dos ecossistemas terrestres, além dos seres humanos, necessitam de água doce para sua sobrevivência. Entretanto, cerca de 97,5% da água de nosso planeta está presente nos oceanos e mares, na forma de água salgada, ou seja, imprópria para o consumo humano. Dos 2,5% restantes, que perfazem o total de água doce existente, 2/3 estão armazenados nas geleiras e calotas polares. Apenas cerca de 0,77% de toda a água está disponível para o nosso consumo, sendo encontrada na forma de rios, lagos, água subterrânea, incluindo ainda a água presente no solo, atmosfera (umidade) e na biota (Figura 1).

No nosso planeta, a água se apresenta em diferentes compartimentos, conforme mostra a Tabela 2 (USGS, 1999). A quantidade de água presente em cada um destes compartimentos, assim como o seu tempo de residência, varia bastante. Os oceanos se constituem no maior destes compartimentos, onde a água tem um tempo de residência de aproximadamente 3 mil anos. Eles são ainda a fonte da maior parte do vapor d'água que aporta no ciclo hidrológico. Sendo grandes acumuladores do calor oriundo do sol, os oceanos desempenham um papel fundamental no clima da Terra.

O segundo maior reservatório de água do planeta são as geleiras e calotas polares. O continente Antártico contém cerca de 85% de todo o gelo existente no mundo. O restante pode ser encontrado no Oceano Ártico e ainda na Groenlândia. As águas

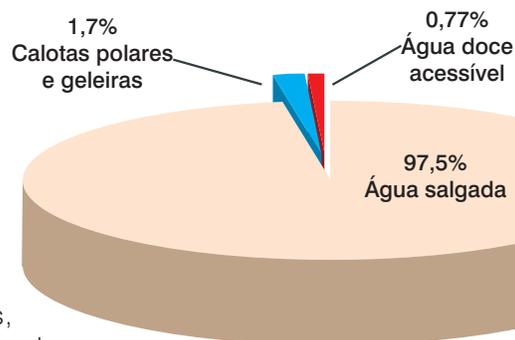


Figura 1: Distribuição da água na Terra.

subterrâneas encontram-se abaixo da superfície em formações rochosas porosas denominadas aquíferos. Estas águas têm influência e também são influenciadas pela composição química e pelos minerais com os quais estão em contato. Os aquíferos são reabastecidos pela água que se infiltra no solo e eventualmente flui para reservatórios que se localizam abaixo de seu próprio nível.

Corpos de água doce em contato direto com a atmosfera compreendem lagos, reservatórios, rios e riachos. Coletivamente, estas águas são chamadas de superficiais.

A concentração de sais na água faz com que as águas superficiais sejam divididas em duas grandes categorias. Águas doces se distinguem de águas salinas pelo seu baixo conteúdo de sais, sendo normalmente encontradas em rios e lagos.

O exemplo mais significativo de águas salinas é o das águas oceânicas. Via de regra, águas salinas apresentam níveis de cerca de 35 g.L⁻¹ de espécies dissolvidas, entre as quais as predominantes são formadas por íons de sódio e cloreto. O encontro das águas doces e salinas resulta em regiões denominadas estuários. Nestas regiões, observa-se geralmente um gradiente de salinidade, cujos níveis aumentam à medida que se aproxima da foz do rio.

Estuários se caracterizam por sua complexidade, onde espécies particuladas e dissolvidas estão sujeitas a mudanças bastante bruscas nos ambientes químico e físico. As maiores alterações ocorrem em função de fatores tais como pH e salinidade. Qual-

quer mudança em um deles pode levar à precipitação de espécies dissolvidas ou ainda à redissolução de materiais anteriormente presentes em sólidos suspensos ou nos sedimentos. Os elementos que não sofrem qualquer alteração durante este processo de mistura, ou seja, aqueles que não se precipitam ou não se dissolvem, apresentam um comportamento que é denominado conservativo. Comportamentos não conservativos resultam da precipitação ou ainda da redissolução de espécies através do estuário.

Um exemplo típico de comportamento não conservativo é a precipitação do ferro coloidal, que ocorre à medida em que se aumenta a salinidade da água de um estuário. Como resultado, o ferro acaba sendo depositado nos sedimentos.

Do ponto de vista ambiental, um importante reservatório são os mangues, nos quais os níveis do lençol freático se encontram praticamente na superfície. Estes ecossistemas suportam uma vasta população de plantas e animais, constituindo-se em berçários bastante importantes para a vida selvagem.

Finalmente, a atmosfera é o compartimento que contém a menor quantidade de água, além de ser aquele onde a água tem o menor tempo de residência, cerca de 10 dias. A

atmosfera contribui para a precipitação, que em última instância é o meio através do qual a água que se evapora predominantemente dos oceanos é devolvida à terra.

O ciclo hidrológico (Figura 2), através da evaporação das águas oceânicas e da precipitação, principalmente, é responsável pela reposição da água doce encontrada no planeta (Manahan, 1997). Contudo, como todos nós sabemos, a ocorrência de chuva no planeta se dá de forma bastante diferenciada. Regiões com regimes de precipitação bastante abundantes dão suporte a densas florestas. Outras regiões têm ocorrência de chuvas praticamente nula e se constituem em

Especialistas acreditam que dentro de cerca de 20 anos, no máximo, teremos no mundo uma crise semelhante à do petróleo, em 1973, relacionada com a disponibilidade de água de boa qualidade

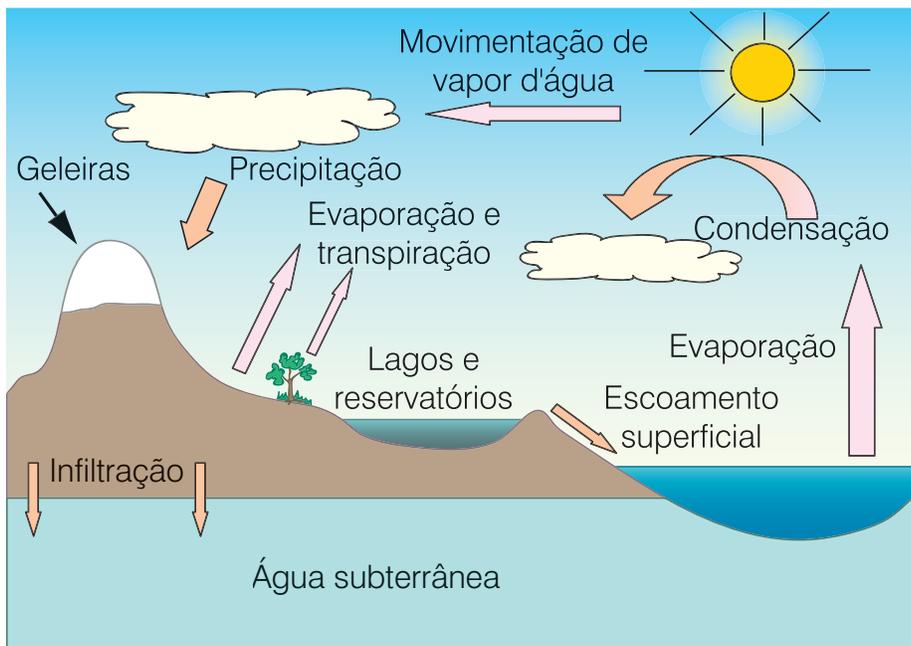


Figura 2: O ciclo hidrológico.

desertos. Em virtude disto, podemos imaginar volumes bastante variáveis de água circulando sobre diferentes regiões do globo. Em regiões com índices elevados de ocorrência de chuva, existe água suficiente para toda a biota

natural, assim como para os seres humanos. Entretanto, em regiões mais secas, especialmente aquelas com elevada densidade populacional, existe um número crescente de conflitos em função das necessidades humanas e naturais.

Existem ao redor do planeta inúmeras situações de ecossistemas em estresse devido à escassez de água. Além disso, são também vários os casos de disputas existentes entre países que dispõem da mesma fonte de água que deve atender às demandas oriundas de atividades agrícolas, urbanas e industriais (Ortolano, 1997).

Especialistas acreditam que dentro de cerca de 20 anos, no máximo, teremos no mundo uma crise semelhante à do petróleo, em 1973, relacionada com a disponibilidade de água de boa qualidade. Assim como ocorreu com o petróleo no passado, a água está se transformando em uma *commodity*¹ em crise. Esta perspectiva preocupante e bastante realista se

deve à provável escassez da água no futuro. Para tanto, basta mencionar que nos últimos 15 anos a oferta de água limpa disponível para cada habitante do planeta diminuiu quase 40% (Nebel e Wright, 2000).

Mesmo o Brasil, que conta com cerca de 12% da água doce disponível no mundo, não deverá escapar da crise hídrica que está sendo prevista. No nosso caso, vale ressaltar que mais de 80% de todo o volume de águas superficiais disponíveis no país se encontram na região amazônica. Os 20% restantes estão distribuídos por todo o país, de maneira pouco uniforme, e se destinam a abastecer aproximadamente 95% da população brasileira (Rebouças *et al.*, 1999).

Em todo o mundo, em média, o maior uso que se faz da água é na agricultura. A irrigação retira aproximadamente 69% da água de boa qualidade do planeta. A irrigação consiste em um tipo de uso denominado consuntivo. Isto quer dizer que o recurso utilizado não retorna para a mesma fonte de onde é proveniente. As atividades industriais, ao contrário, são consideradas não consuntivas, uma vez que a água, embora possa estar contaminada com determinados resíduos, retorna para sua fonte, permanecendo disponível. Estas atividades consomem cerca de 23% e o homem,

através do uso direto, é responsável pelo consumo de 8% da água disponível no planeta. Certamente estes valores percentuais podem variar dependendo da disponibilidade da água, do grau de desenvolvimento da região e até mesmo de aspectos culturais. Em algumas partes dos Estados Unidos, por exemplo, o uso doméstico da água pode atingir 600 L por habitante, por dia. Em alguns países africanos, ao contrário, o uso de água per capita não é superior a 10 L ao dia (Nebel e Wright, 2000).

Os dados apresentados anteriormente deixam claro que o estresse hídrico previsto não é mera especulação. Ao contrário, para atender a uma demanda crescente por alimentos, frente às estimativas de crescimento populacional feitas pela Organização das Nações Unidas (ONU) para os próximos anos, a expectativa é de um maior uso de água na irrigação.

Qualidade e poluição da água

Tão ou mais importante que a questão envolvendo a quantidade de água disponível, apresenta-se também a questão da qualidade da água disponível. A qualidade da água ao redor de nosso planeta tem se deteriorado de forma crescente, especialmente nos últimos 50 anos. Problemas relacionados com a poluição da água se intensificaram principalmente após a Segunda Guerra Mundial, quando foram observados aumentos significativos nos processos de urbanização e industrialização. Antes de falar em poluição de águas, entretanto, é necessário que este termo seja definido de forma adequada. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, a CETESB, define poluição como “qualquer substância que possa tornar o meio ambiente impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna, à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade”.

As primeiras evidências da relação entre doenças e o consumo de água poluída foram estabelecidas na metade do século passado em Londres, na Inglaterra, através da ocorrência de uma epidemia de cólera

Portanto, qualquer substância causadora de poluição é denominada poluente.

A poluição das águas é principalmente fruto de um conjunto de atividades humanas. E os poluentes alcançam águas superficiais e subterrâneas de formas bastante diversas. Este aporte é arbitrariamente classificado como pontual ou difuso, principalmente para efeito de legislação. Fontes pontuais compreendem a descarga de efluentes a partir de indústrias e estações de tratamento de esgoto, dentre outras. Estas fontes são de identificação bastante fácil e portanto podem ser facilmente monitoradas e regulamentadas. É relativamente fácil se determinar a composição destes resíduos, assim como definir seu impacto ambiental. Além disso, é possível se responsabilizar o agente poluidor, caso haja necessidade. Ao contrário, as fontes difusas apresentam características bastante diferenciadas. Elas se espalham por inúmeros locais e são particularmente difíceis de serem determinadas, em função das características intermitentes de suas descargas e também da abrangência sobre extensas áreas. Fontes difusas incluem o escoamento superficial urbano, escoamento superficial de áreas agrícolas, deposição atmosférica (seca e úmida), etc (Bunce, 1994).

Existem duas estratégias adotadas no controle da poluição aquática: (1) redução na fonte e (2) tratamento dos resíduos de forma a remover os contaminantes ou ainda de convertê-los a uma forma menos nociva. O tratamento dos resíduos tem sido a melhor opção no caso de contaminantes de fontes pontuais. A redução na fonte pode ser aplicada a contaminantes provenientes de ambas as fontes, tanto pontuais quanto difusas.

Existem duas estratégias adotadas no controle da poluição aquática: (1) redução na fonte e (2) tratamento dos resíduos

de forma a remover os contaminantes ou ainda de convertê-los a uma forma menos nociva. O tratamento dos resíduos tem sido a melhor opção no caso de contaminantes de fontes pontuais. A redução na fonte pode ser aplicada a contaminantes provenientes de ambas as fontes, tanto pontuais quanto difusas.

Muitas pessoas atribuem o aumento da expectativa de vida da população mundial à medicina moderna. Na verdade, esta melhora é muito mais fruto da prevenção de doenças, que se tornou possível através das medidas aqui mencionadas

As primeiras evidências da relação entre doenças e o consumo de água poluída foram estabelecidas na metade do século passado em Londres, na Inglaterra, através da ocorrência de uma epidemia de cólera. Sabe-se hoje que a água é um dos principais vetores na transmissão de doenças. Cólera e tifo, que são transmitidas pela água, mataram milhões de pessoas no passado e são ainda uma das principais causas de doenças ao redor do globo, especialmente nos países subdesenvolvidos (Glynn Henry e Heinke, 1996).

Desta forma, os poluentes aquáticos mais sérios são os microorganismos patogênicos, ou seja, aqueles causadores de doenças e mortes. Estes microorganismos encontram-se freqüentemente presentes nos excrementos de seres humanos e de animais, podendo ser bactérias, vírus, parasitas etc. Através de águas residuárias, os microorganismos aportam em corpos aquáticos receptores e podem assim contaminar novos indivíduos.

Desde o início deste século, têm sido adotadas medidas de saúde pública visando minimizar os efeitos destas doenças, especialmente nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Tais medidas envolvem prioritariamente duas estratégias: (1) o tratamento e desinfecção da água destinada ao abastecimento público e (2) a coleta e tratamento do esgoto.

Muitas pessoas atribuem o aumento da expectativa de vida da população mundial à medicina moderna. Na verdade, esta melhora é muito mais fruto da prevenção de doenças, que se tornou possível através das medidas mencionadas anteriormente. Apesar disto, cerca de 1,4 bilhão de pessoas em todo o mundo ainda não têm acesso à água potável tratada. Da mesma forma, 2,9 bilhões de pessoas vivem em áreas sem que haja coleta ou tratamento do esgoto. Em virtude da falta de condições básicas de saneamento, especialmente tratamento da

água e do esgoto, uma fração significativa da população mundial se encontra cronicamente infectada com organismos patogênicos. Mais de 250 milhões de casos de doenças transmitidas pela água são registrados anualmente em nosso planeta, e cerca de 10 milhões destes casos irão resultar em mortes, especialmente de crianças, que são vítimas em 50% dos casos (Nebel e Wright, 2000).

Os esgotos doméstico e industrial também introduzem nos sistemas aquáticos diversos tipos de matéria orgânica. Com exceção dos plásticos e outros produtos químicos sintéticos, esta matéria orgânica tem características biodegradáveis. Quando bactérias e outros organismos detritívoros decompõem a matéria orgânica, eles consomem o oxigênio que se encontra dissolvido na água. A quantidade de oxigênio que pode ser dissolvida na água é bastante limitada. Em águas frias, os níveis de oxigênio dissolvido podem atingir cerca de 10 ppm (mg.L^{-1}), sendo que a solubilidade do gás diminui com o aumento da temperatura. O valor acima pode ser considerado bastante baixo se comparado com os níveis de oxigênio no ar, por exemplo, que são da ordem de 210.000 ppmv^2 (21%). Assim sendo, mesmo quantidades moderadas de matéria orgânica podem resultar em uma diminuição significativa no oxigênio dissolvido presente em águas naturais. O grau de consumo de oxigênio que ocorre quando uma dada substância é oxidada através de um processo microbiológico é avaliado através de uma análise denominada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), explicada em detalhes no texto sobre tratamento de esgoto (p. 28).

Outra forma de poluição de águas superficiais, especialmente de lagos e reservatórios, é a eutrofização artificial. Estes corpos aquáticos sofrem um processo de enriquecimento de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio. Sedimentos e materiais dissolvidos são constantemente carregados para lagos e reservatórios, em um processo bastante lento, que pode durar milhares de anos. Entretanto, a descarga de esgoto não tratado e de resíduos agrícolas e industriais têm

Fósforo: o vilão da eutrofização

O fósforo é o nutriente limitante no crescimento de algas. Microorganismos requerem carbono, nitrogênio e fósforo como nutrientes majoritários. Assim como as reações químicas deixam de se processar quando um reagente limitante é totalmente consumido, o crescimento de algas é limitado pela disponibilidade de nutrientes na água. A transformação de nutrientes em biomassa ocorre em uma proporção média de C:N:P = 110:15:1. O carbono nunca é a espécie limitante na água, uma vez que sua presença é suprida pelo CO_2 atmosférico. Algas verde-azuladas podem suprir as necessidades em termos do nitrogênio, pois são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico. Assim sendo, o fósforo é usualmente o elemento limitante, embora seja necessário na menor quantidade.

Nas décadas de 50 e 60 sais de fosfato eram utilizados em grandes quantidades na formulação de detergentes, visando regular o pH da solução de lavagem e também para manter íons como Ca^{2+} em solução (abrandando a dureza e produzindo mais espuma). Como consequência, são inúmeros os registros de eutrofização em lagos e reservatórios de todo o mundo, contidos na literatura. Os chamados Grandes Lagos, localizados ao norte dos Estados Unidos e sul do Canadá, são exemplos de ambientes aquáticos severamente atingidos pelo fenômeno da eutrofização artificial. São, igualmente, bons exemplos de cooperação internacional entre países. Desde a década de 70 as legislações norte-americana e canadense impuseram sérias restrições ao uso de fosfatos em detergentes, de tal forma que estes lagos têm sido recuperados desde então. Os níveis médios de fosfato no esgoto canadense caíram de 10 mg.L^{-1} em 1969 para 5 mg.L^{-1} em 1974, permanecendo abaixo deste valor até os dias atuais (Glynn Henry e Heike, 1996).

contribuído para acelerar este processo. No Brasil, as lagoas da Pampulha, em Belo Horizonte, e do Taquaral, em Campinas, assim como o Lago Paranoá, em Brasília, são exemplos de corpos aquáticos eutrofizados. O aporte excessivo de nutrientes tais como fósforo e nitrogênio provoca o crescimento descontrolado de algas. Gera-se então uma biomassa maior que aquela que o sistema poderia naturalmente controlar. O aumento excessivo na população e sua posterior degradação no corpo aquático gera uma demanda de oxigênio grande, a qual pode então provocar a morte de animais aquáticos (peixes) e também a proliferação de organismos anaeróbios. Em seu estágio final, estes lagos e reservatórios produzem compostos mal-cheirosos e altamente tóxicos para a biota.

Anualmente, milhões de toneladas de compostos orgânicos sintéticos são produzidos globalmente. Estes compostos são largamente empregados na produção de plásticos, fibras sintéticas, borracha sintética, solventes, pesticidas, agentes preservantes de madeira, entre uma centena de outros

produtos. Em função de sua estrutura química, muitos destes compostos são resistentes à biodegradação. Esta é, inclusive, uma das principais propriedades que tornam tais compostos de grande utilidade.

Inúmeros destes compostos são considerados poluentes aquáticos. Ao mesmo tempo, muitos deles se constituem em substâncias às quais a biota aquática ainda não foi exposta. Assim sendo, os efeitos destes compostos sobre os mais variados tipos de organismos aquáticos ainda são totalmente desconhecidos, particularmente no caso de exposições prolongadas e em concentração muito baixa. Muitos deles podem ser mutagênicos (causadores de mutação), cancerígenos ou ainda teratogênicos (causadores de defeitos em recém-nascidos). Podem ainda causar disfunções nos rins e fígado, esterilidade e inúmeros problemas de natureza fisiológica ou ainda neurológica.

A presença de compostos orgânicos persistentes é causa de grande preocupação, principalmente quando são encontrados em águas destinadas ao abastecimento público.

Bioconcentração de substâncias químicas

Muitos compostos químicos sintéticos têm sido encontrados em concentrações relativamente elevadas em tecidos de peixes e outros animais aquáticos, especialmente daqueles localizados em rios e lagos próximos a grandes centros industriais. Alguns destes compostos são o DDT, as bifenilas policloradas (PCB) e dioxinas, entre outros (veja suas fórmulas estruturais no texto sobre o lixo). Concentrações relativamente elevadas, neste caso, significam $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (ppb) ou até mesmo $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ppm). A evidência dos efeitos tóxicos destas substâncias é causa de grande preocupação e conseqüentemente a legislação tem estabelecido restrições no consumo de peixes provenientes de regiões poluídas.

Os peixes que vivem em águas poluídas, quando em contato com substâncias não polares, tendem a acumular muitos destes compostos através de um processo denominado bioacumulação. Isto ocorre quando uma substância não polar presente na água é absorvida pela gordura do peixe. A gordura funciona, neste caso, como um solvente não polar que extrai a substância química da água. Em outras palavras, pode-se formular uma constante de equilíbrio para descrever a distribuição de uma espécie entre dois líquidos imiscíveis, como o óleo e a água, por exemplo. A constante de distribuição, também conhecida como constante de partição (K_d) é definida como:

$$K_d = \frac{\text{concentração do soluto no solvente 1}}{\text{concentração do soluto no solvente 2}}$$

Os valores de K_d para a razão entre as concentrações de substâncias químicas na gordura e na água são elevados. Por esta razão, organismos aquáticos geralmente bioconcentram substâncias químicas não polares presentes nas águas onde eles vivem. Em função disto, as concentrações destas substâncias podem ser, em alguns casos, milhares de vezes mais elevadas nos organismos do que na água.

Do ponto de vista experimental, é bastante difícil trabalhar com o tecido de organismos aquáticos. Assim sendo, um solvente químico é utilizado com o propósito de se mimetizar o comportamento químico do tecido animal. O octanol é o solvente mais comumente empregado na previsão do fator de bioconcentração (FBC) de compostos orgânicos presentes na água.

$$K_d = \frac{\text{concentração do soluto em octanol}}{\text{concentração do soluto em água}}$$

Uma estratégia comum consiste em considerar que organismos aquáticos possuem cerca de 5% de gordura, em peso. Sob estas condições pode-se considerar a seguinte aproximação:

$$\text{FBC} = 0,05 \times K_d$$

A bioconcentração pode elevar os níveis de substâncias potencialmente tóxicas em várias ordens de grandeza. Por esta razão, muitas vezes a água de um determinado local pode ser considerada própria para o consumo humano, enquanto o consumo de peixes e outros animais aquáticos pode ser bastante restrito (Bunce, 1994).

Entre os compostos orgânicos sintéticos, uma classe preocupante são os hidrocarbonetos halogenados, ou seja, compostos orgânicos onde um ou mais átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de cloro, fluor, bromo ou ainda iodo. Dentre estes, os hidrocarbonetos clorados são os mais comuns. Estes compostos são vastamente empregados na indústria de

plásticos (cloreto de polivinila - PVC), pesticidas (DDT), solventes (tetracloroetileno) e de isolamento elétrico (bifenilas policloradas), entre outras.

Outra classe de substâncias químicas que não se degradam no ambiente são os metais pesados. A toxicidade de metais é diferenciada daquela dos pesticidas, por exemplo. Pesticidas, em geral, são compostos orgânicos

cujas toxicidade resulta de modificações no arranjo de átomos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, dentre outros. Estes elementos não metálicos não são intrinsecamente tóxicos. Conseqüentemente, torna-se possível sua conversão para estruturas não tóxicas, o que pode ser feito através de processos químicos ou ainda biológicos. Esta mesma estratégia não é possível, no entanto, para os metais pesados, onde o elemento é intrinsecamente tóxico, embora esta toxidez dependa, como se verá adiante, da espécie química formada pelo metal.

Os metais pesados mais perigosos são o chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, estanho, crômio, zinco e cobre. Estes metais são largamente utilizados na indústria, particularmente na laminação de metais. Alguns deles estão também presentes em determinados pesticidas e até mesmo em medicamentos. São ainda usados em pigmentos, esmaltes, tintas e corantes. Em virtude deste vasto espectro de utilidades, os metais aportam em sistemas aquáticos por várias fontes e espécies diferentes (Manahan, 1997).

Um outro aspecto importante a respeito da presença de metais em ambientes aquáticos diz respeito à forma com que a espécie metálica se encontra em solução. Os elementos metálicos se diferenciam pela quantidade com que estão presentes, mas também em função das interações que possuem com outras espécies dissolvidas. Isto significa que um metal pode estar presente em um corpo d'água em várias formas físico-químicas diferentes. A forma físico-química como um metal se apresenta é chamada de especiação química (Howard, 1998). A importância da compreensão da especiação química de um elemento metálico se deve ao fato dela influenciar as propriedades, a disponibilidade biológica e, conseqüentemente, a toxicidade do metal tanto em águas naturais quanto em águas residuárias. No caso do mercúrio, por exemplo, sais como $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ são bastante solúveis e se estiverem presentes em água, o íon $\text{Hg}(\text{II})$ permanecerá em solução e sua concentração deve ser elevada. Exceto se ânions como o sulfeto também estiverem presentes, pois o HgS

é uma espécie altamente insolúvel e provavelmente deve se depositar nos sedimentos de corpos aquáticos. Os compostos orgânicos contendo mercúrio (aqueles que apresentam ligações covalentes C-Hg) são muito mais tóxicos para os mamíferos que os sais simples de Hg(II). Os compostos organo-mercuriais apresentam características não polares e podem ser bioconcentrados em tecidos biológicos.

Um íon metálico presente em solução pode se combinar com uma espécie doadora de elétrons para formar um complexo. O doador de um par de elétrons é uma base de Lewis e é definido como o ligante. Um exemplo deste tipo de combinação é mostrado abaixo, para o cádmio:



Íons cianeto adicionais podem se ligar sucessivamente para formar os complexos $\text{Cd}(\text{CN})_2$, $\text{Cd}(\text{CN})_3^-$ e $\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$. Neste exemplo, o íon cianeto é um ligante monodentado, o que significa que ele tem apenas um sítio capaz de se ligar ao íon cádmio. Em águas naturais, no entanto, estão presentes outros tipos de ligantes, que são denominados agentes quelantes. Um agente quelante quando ligado a um íon metálico forma um composto chamado de quelato. Em geral, como um agente quelante pode se ligar ao metal por mais de uma posição simultaneamente, os quelatos são complexos mais estáveis que aqueles envolvendo ligantes monodentados. A estabilidade dos quelatos metálicos tende a ser proporcional ao número de sítios quelantes disponíveis no agente quelante.

As substâncias húmicas se constituem na classe mais importante de agentes complexantes naturais. Estas substâncias são bastante persistentes e têm sua origem na decomposição de vegetais que se depositam no solo, em sedimentos etc. São uma mistura complexa de materiais poliméricos, com massas molares acima de $300 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. As substâncias húmicas são classificadas de acordo com sua solubilidade em água. As huminas são insolúveis, os ácidos húmicos são solúveis apenas em bases e os ácidos

fúlvicos são solúveis em ácidos e bases. Em função de suas propriedades de natureza ácido-base, de adsorção e de complexação, as substâncias húmicas, tanto solúveis quanto insolúveis, têm um efeito importante nas propriedades de águas naturais. Normalmente, os ácidos fúlvicos se dissolvem em água, agindo como uma espécie solúvel. Os ácidos húmicos e huminas, por outro lado, permanecem insolúveis e afetam as características de corpos aquáticos através da troca de espécies, tais como cátions e substâncias orgânicas, com a água.

A elevada capacidade de complexação frente a metais é um dos aspectos ambientais mais importantes das substâncias húmicas e se deve, em grande parte, à presença em sua estrutura de um elevado número de grupos carboxílicos e fenólicos. Ferro e alumínio formam complexos bastante estáveis com as substâncias húmicas, ao contrário do magnésio, por exemplo. Os complexos envolvendo metais e ácidos fúlvicos desempenham um papel importante em águas naturais, pois são responsáveis pela permanência, em solução, de metais de transição

que participam de processos biológicos. Particularmente, estão envolvidos nos mecanismos de solubilização e transporte do ferro em águas naturais.

Tratamento da água

Um dos grandes benefícios das tecnologias modernas tem sido a drástica redução das doenças transmitidas pela água, entre elas a cólera e o tifo. Nos dias atuais, estas doenças não representam mais a mesma ameaça que já representaram no passado. O aspecto chave para este avanço foi o reconhecimento que a contaminação dos reservatórios de águas destinadas ao abastecimento público, especialmente por resíduos humanos, era a principal fonte de infecção. A partir de então não foi difícil reconhecer que muitas doenças poderiam ser eliminadas através de um tratamento mais efetivo da água, assim como de uma melhor disposição para os rejeitos.

A filtração da água potável foi usada, pioneiramente, no início do século XIX, na Escócia e Inglaterra. Atualmente, as estações de tratamento de água (ETA) são projetadas para forne-

A doença de Minamata

Um episódio bastante trágico envolvendo mercúrio e outros metais pesados, conhecido como “Doença de Minamata”, está largamente registrado na literatura. O episódio recebeu o nome do local onde ocorreu, uma pequena vila de pescadores localizada no Japão. Na metade dos anos 50, os gatos da região começaram a apresentar movimentos espasmódicos estranhos, seguidos de paralisia parcial, estado de coma e morte. Inicialmente, imaginava-se que se tratava apenas de uma síndrome peculiar dos gatos e pouca atenção foi dada ao problema. Entretanto, pouco tempo depois, os mesmos sintomas foram observados em habitantes da região, causando grande preocupação. Sintomas adicionais, como insanidade, retardamento mental e defeitos em recém-nascidos também foram observados. Após estudarem vários casos, especialistas diagnosticaram que a causa das doenças era uma intoxicação aguda por mercúrio.

Uma indústria química localizada na região estava descartando seus resíduos contendo mercúrio em um rio que seguia pela Baía de Minamata, onde os habitantes locais pescavam. O mercúrio orgânico descartado se acumulava nos sedimentos da baía, sendo ingerido primeiramente por bactérias e sendo transferido pela cadeia alimentar para peixes e finalmente gatos ou seres humanos. Os gatos foram as primeiras vítimas por se alimentarem quase que exclusivamente dos restos de peixes. Quando a situação foi finalmente controlada, cerca de 50 pessoas haviam morrido e outras 150 haviam contraído problemas ósseos e nervosos. Ainda hoje as marcas da tragédia permanecem, nos deficientes físicos e mentais de alguns descendentes de pessoas atingidas (Nebel e Wright, 2000).

cer água continuamente, de maneira a atender a critérios de potabilidade. No Brasil, as normas e padrões de potabilidade para a água destinada ao consumo humano, em vigor nos dias atuais, estão dispostas na Portaria n. 36 do Ministério da Saúde, de 19 de janeiro de 1990. Cabe ao Ministério da Saúde, em articulação com as autoridades sanitárias competentes dos Estados e Distrito Federal, exercer a fiscalização e o controle do exato cumprimento das normas e padrões previstos pela portaria.

As principais operações consistem na decantação, coagulação/floculação, filtração e desinfecção (Figura 3). Estas operações têm como principais objetivos a remoção do material particulado, bactérias e algas; remoção da matéria orgânica dissolvida, que confere cor a água e remoção ou destruição de organismos patogênicos tais como bactérias e vírus. Estas operações podem evidentemente variar dependendo da fonte de água e igualmente dos padrões a serem alcançados (Glynn Henry e Heinke, 1996).

No caso do tratamento de águas superficiais, a água se move pela ação gravitacional e a primeira etapa consiste na remoção de material com maior tamanho através de grades. Ocasionalmente, a água que apresenta baixa turbidez pode ser tratada através da decantação direta, sem adição de substâncias químicas, e posterior filtração, para remoção de partículas menores que não se decantam naturalmente. Em muitos casos, no entanto, um agente químico é adicionado para

coagular e flocular as partículas com menor tamanho. Estas partículas, de tamanho coloidal, podem então ser removidas por decantação, em tanques, ou diretamente em filtros.

A sedimentação é a forma mais antiga e comum de tratamento de águas e águas residuárias. Usa a gravidade como agente de decantação responsável pela remoção do material particulado suspenso da água. Trata-se de um processo simples e de baixo custo e é realizado em tanques de diferentes tamanhos e formas.

As partículas presentes em águas têm diâmetros que variam entre 10^{-1} e 10^{-7} mm. A turbidez é causada por partículas maiores que 10^{-4} mm, enquanto aquelas menores que 10^{-4} mm contribuem para a ocorrência de cor e sabor na água. Do ponto de vista operacional, estas últimas são consideradas como dissolvidas, ao contrário de particuladas.

A água contendo o material particulado flui lentamente para o tanque de decantação, onde fica retida por um tempo suficiente para que as partículas maiores possam decantar para o fundo do tanque. O material que lentamente se deposita no fundo do tanque é removido manualmente ou ainda mecanicamente. Aquele material de dimensões muito pequenas que não se decanta naturalmente é então removido por filtração ou outros métodos.

A coagulação/floculação é um

procedimento químico e físico onde partículas muito pequenas são desestabilizadas e então agregadas para que possam se decantar. Um percentual significativo das partículas presentes em águas superficiais são tão pequenas que demorariam dias ou até mesmo semanas para se decantarem naturalmente.

A coagulação é um processo químico usado para se desestabilizar partículas coloidais. Adiciona-se um agente químico para gerar íons carregados positivamente na

água, que contém colóides carregados negativamente. Como resultado, ocorre uma redução na repulsão existente entre as partículas. Inicialmente, agita-se rapidamente o sistema durante cerca de 30 s, afim de aumentar a dispersão do coagulante. Em seguida, o sistema é agitado lentamente, permitindo o contato entre as partículas, no processo denominado floculação. Esta agitação lenta e constante pode ser obtida através de pás movidas mecanicamente ou ainda por meio hidráulico, através do direcionamento adequado do fluxo de água que entra no tanque de coagulação/floculação. Por intermédio da ação combinada de processos químicos e físicos da coagulação/floculação, as partículas coloidais que não iriam se decantar são aglomeradas, formando sólidos de maior tamanho chamados flocos. O sulfato de alumínio é o agente coagulante mais freqüentemente utilizado. Entretanto, outras substâncias químicas, tais como sais de ferro(III) ou ainda polímeros orgânicos, podem ser empregados na coagulação.

A química da coagulação é relativamente complexa, mas pode ser ilustrada através de equações químicas simplificadas. A coagulação usando $Al_2(SO_4)_3$ pode ser descrita através das seguintes etapas:

1. O sulfato de alumínio em água gera as espécies Al^{3+} e SO_4^{2-} . Parte dos íons Al^{3+} neutraliza as cargas negativas dos colóides.

2. A maior parte dos íons Al^{3+} se combina com íons OH^- presentes na

Por intermédio de processos químicos e físicos da coagulação/floculação, as partículas coloidais que não iriam se decantar são aglomeradas, formando sólidos de maior tamanho chamados flocos

Um percentual significativo das partículas presentes nas águas superficiais apresenta dimensão de tal modo reduzida que demoraria dias ou até mesmo semanas para se decantar naturalmente

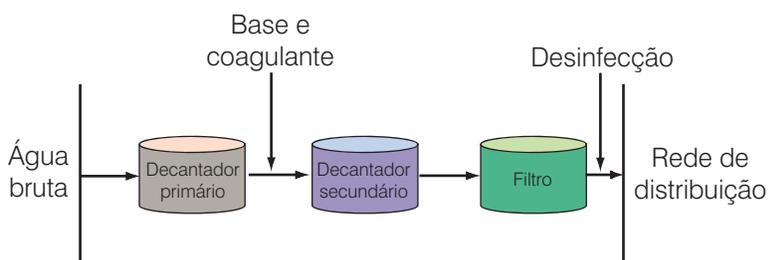
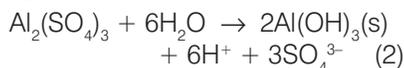


Figura 3: Representação esquemática de uma estação de tratamento de água.

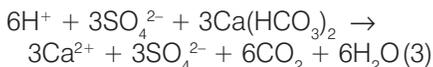
água formando $\text{Al}(\text{OH})_3$, que interage com outros cátions presentes em solução:



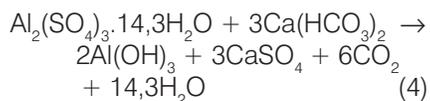
Deve-se observar que o hidróxido de alumínio formado tem uma constante de solubilidade bastante baixa ($K_{\text{ps}} = 3,0 \times 10^{-34}$).

3. O $\text{Al}(\text{OH})_3$ se caracteriza como uma dispersão coloidal (sol) positivamente carregada, que neutraliza as cargas das partículas coloidais presentes na água. O excesso de $\text{Al}(\text{OH})_3$ é neutralizado pelos íons SO_4^{2-} .

O excesso de íons H^+ formados tende a diminuir o pH do meio, o que pode contribuir para a interrupção da formação do $\text{Al}(\text{OH})_3$, que é dependente do pH. Em alguns casos, o excesso de H^+ é removido pela alcalinidade, presente em águas naturais na forma de íons HCO_3^- :



A reação geral, combinando as duas equações anteriores, é:



que revela que 600 partes de sulfato de alumínio devem ser adicionadas para cada 300 partes de alcalinidade (expressa como CaCO_3). Se a alcalinidade do meio for insuficiente, o pH do meio deve ser aumentado pela adição de base, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH ou ainda Na_2CO_3 . O pH ideal para a coagulação com sulfato de alumínio é aproximadamente 7.

Normalmente, não é possível se obter uma solução totalmente clarificada apenas através do uso da decantação direta ou ainda pela combinação da coagulação/floculação e decantação. Assim sendo, faz-se necessário o uso da filtração na extensa maioria dos processos de tratamento de água. Nestes casos, a filtração é o processo através do qual a água passa por um filtro que se constitui em uma camada

de areia fina depositada sobre camadas de cascalho ou pedregulho. O mecanismo da filtração inclui a retenção de partículas maiores que os poros do filtro; floculação, que ocorre quando as partículas são forçadas a se aproximar do leito filtrante; e sedimentação das partículas nos poros do filtro. Com o passar do tempo, os poros do filtro, especialmente os das camadas superiores, se entopem e então o filtro tem que ser limpo através de retrolavagem.

O cloro é uma espécie química altamente reativa e quando adicionado à água deve oxidar substâncias orgânicas e inorgânicas igualmente

Para assegurar que a água esteja livre de microorganismos patogênicos, ela deve passar por um processo de desinfecção. A cloração é o método de desinfecção mais

comumente utilizado na maioria dos países. Quantidades suficientes de cloro, na forma do gás cloro ou ainda de hipoclorito, são adicionadas à água visando destruir ou inativar os organismos alvo. A cloração permanece como sendo um método confiável, de relativo baixo custo e de simplicidade de aplicação. Outros agentes desinfetantes podem ser as cloraminas, dióxido de cloro, ozônio e radiação ultravioleta. A ozonização tem sido bastante utilizada na França e tem ganho popularidade nos Estados Unidos, nos últimos anos (Bunce, 1994).

O cloro se apresenta na forma de gás, sob condições normais de pressão e temperatura.

Este gás pode ser comprimido para ser estocado em cilindros, na forma líquida. Como o cloro é um gás altamente tóxico, ele é normalmente dissolvido em

água, sob pressão reduzida, e a solução concentrada resultante é aplicada à água que vai ser tratada. O cloro também pode ser encontrado na forma sólida, como hipoclorito de cálcio, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$, ou ainda na forma de solução, como hipoclorito de sódio, NaOCl .

O gás cloro reage quase completamente com a água para formar o ácido hipocloroso:



O ácido hipocloroso se dissocia, gerando os íons H^+ e OCl^- :



A presença do cloro diminui o pH da água pela liberação de íons H^+ . O pH do meio é importante porque influencia na extensão com que o ácido hipocloroso se ioniza. Sob valores de pH inferiores a 7,5, o ácido hipocloroso é a espécie predominante. Seu potencial de desinfecção é cerca de 80 vezes superior se comparado ao hipoclorito, que é a espécie predominante sob valores de pH superiores a 7,5. O HOCl e o OCl^- são denominados cloro livre disponível, o que em outras palavras significa disponíveis para a desinfecção. Assim sendo, o potencial de desinfecção do ácido hipocloroso é significativamente aumentado sob valores pH mais baixos, em função da maior proporção de HOCl presente no meio (Sawyer *et al.*, 1994).

O cloro é uma espécie química altamente reativa e quando adicionado a água deve oxidar substâncias orgânicas e inorgânicas igualmente. Em consequência disto, nem todo o cloro adicionado a água irá produzir o chamado cloro livre disponível. A quantidade de cloro que reage com espécies inorgânicas (Fe^{2+} , Mn^{2+} , NO_2^- e NH_3) e impurezas orgânicas é denominada de demanda de cloro. Esta demanda deve ser satisfeita antes da formação do cloro livre disponível.

Os aspectos básicos envolvidos no

sucesso da cloração são a dose e o tempo de contato. Uma quantidade suficiente de cloro deve ser adicionada para que a demanda por cloro seja satisfeita e para gerar uma concentração de

pelo menos $0,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de cloro livre disponível, após um contato de 10 minutos, sob pH 7. O excesso de cloro também deve ser evitado, caso contrário a água irá apresentar um sabor característico indesejado. Isto significa que em uma ETA devem ser feitos testes freqüentes visando se determinar a dose correta de cloro a ser aplicada.

Além destes aspectos, a água a ser

distribuída para a população deve conter um certo teor de cloro residual, que pode ser determinado em uma amostra coletada na torneira de nossas casas. Isto é feito para se prevenir que haja nova contaminação da água, principalmente durante o processo de distribuição.

Um dos problemas decorrentes do uso do cloro como agente de desinfecção está relacionado com sua capacidade em reagir com as substâncias orgânicas de ocorrência natural, que podem estar presentes na água. Estas reações produzem os trihalometanos (THM), entre eles o clorofórmio, que é cancerígeno. Os THM não são removidos da água através do tratamento convencional, e desta forma deve-se assegurar que a matéria orgânica deve estar ausente da água que vai ser submetida a cloração.

Considerações finais

Os avanços conquistados na área de saneamento básico, especialmente no desenvolvimento de técnicas de tratamento de água, têm contribuído para a melhoria da qualidade de vida de boa parte da população de nosso planeta. Contudo, restam ainda vários obstáculos no estabelecimento de um balanço adequado entre nossas necessidades

e o funcionamento dos diversos ecossistemas da Terra. Primeiramente, é importante mencionar que uma parcela significativa da população mundial ainda não tem acesso a água tratada. No Brasil, esta situação não é diferente, pois mais de 50% de nossa população se encontra nesta situação.

A demanda por água de boa qualidade, tanto de populações rurais quanto urbanas de países menos desenvolvidos, foi identificada pela ONU como o principal desafio mundial existente no início dos anos 80. Passadas duas décadas, verifica-se que a situação pouco se modificou. Ao contrário, observa-se que esta demanda tem aumentado, em função do crescimento populacional do planeta. Este crescimento populacional, aliado ao desen-

volvimento industrial e a necessidade por alimentos, deve continuar aumentando a demanda por água, o que deve gerar sérios problemas de abastecimento no futuro próximo. Ao mesmo tempo torna-se evidente uma progressiva deterioração na qualidade das fontes de água doce, decorrente do descarte de resíduos domésticos e industriais para os corpos aquáticos receptores. Todos estes dados apontam para a necessidade de uma mudança drástica de nosso comportamento frente ao uso da água.

Do ponto de vista quantitativo, a agricultura, que consome cerca de 70% da água de boa qualidade existente no planeta, constitui-se no setor com as maiores potencialidades em termos de economia, principalmente através do uso de métodos mais eficientes e de menor desperdício. Quantidades significativas de água também podem ser poupadas pelo setor industrial, através de processos efetivos de reciclagem e reuso. A adoção de medidas que implementem o tratamento de resíduos tanto domésticos quanto

industriais também tende a contribuir para com a melhoria da qualidade das águas superficiais, principalmente.

Fica portanto evidente que tanto no plano local quanto global, todas estas questões

terão que ser resolvidas se o que se almeja é o uso sustentável da água. Isto representa um grande desafio e medidas de natureza política, assim como se mostram necessárias mudanças de atitude por parte da população. Ao mesmo tempo, novos desafios de natureza científica e tecnológica estão sendo colocados frente à comunidade científica mundial, na busca por inovações tecnológicas ambientalmente corretas. Neste sentido, a compreensão de processos fundamentais, assim como sua interdependência, continuarão sendo essenciais. Todos estes objetivos só serão efetivamente alcançados, contudo, se o poder público abandonar medidas meramente paliativas e investir profundamente na busca e adoção de novas soluções. O uso sustentável

da água é vital para nossa sobrevivência no futuro.

Notas

1. Mercadoria em estado bruto ou produto básico de importância comercial, como café, cereais, algodão, petróleo etc., cujo preço é controlado por bolsas internacionais.

2. Para misturas gasosas, 1 ppmv (parte por milhão em volume) corresponde a $10^{-6} \times p(\text{total})$. Portanto, ao nível do mar, onde $p(\text{total}) = 1 \text{ atm}$, $1 \text{ ppmv} = 10^{-6} \text{ atm}$. Entretanto, se $p(\text{total}) = 0,01 \text{ atm}$ (valor encontrado a 30 km de altitude), $1 \text{ ppmv} = 10^{-6} \times 0,01 \text{ atm}$, ou seja, 10^{-8} atm .

Marco Tadeu Grassi(mtgrassi@quimica.ufpr.br), químico, mestre em química analítica e doutor em química analítica ambiental pela Unicamp, tem pós-doutorado em engenharia ambiental pela Universidade de Delaware (EUA) e é professor na Universidade Federal do Paraná.

Referências bibliográficas

BUNCE, N. *Environmental Chemistry*". 2ª ed. Winnipeg: Wuerz Publishing Ltd, 1994.

BUNCE, N. *Introduction to Environmental Chemistry*. Winnipeg: Wuerz Publishing Ltd, 1993.

GLYNN HENRY, J. e HEINKE, G.W. *Environmental Science and Engineering*. 2ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

HOWARD, A.G. *Aquatic Environmental Chemistry*. New York: Oxford Science Publications, 1998.

MANAHAN, S.E. *Environmental Science and Technology*. New York: Lewis Publishers, 1997.

MASTERTON, W., SLOWINSKI, E.J. e STANITSKI, C.L. *Princípios de Química*. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1990.

NEBEL, B.J. e WRIGHT, R.T. *Environmental Science*. 7ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

ORTOLANO, L. *Environmental Regulation and Impact Assessment*. New York: John Wiley & Sons, 1997.

REBOUÇAS, A., GALÍZIA TUNDISI J. e BRAGA, B. *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, USP, 1999.

SAWYER, C.N., MCCARTY, P.L. e PARKIN, G.F. *Chemistry for Environmental Engineering*. 4a. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Water Science for Schools home page*. [Online] Disponível em <http://ga.water.usgs.gov/edu/>

Todos os dados apresentados aqui apontam para a necessidade de uma mudança drástica de nosso comportamento frente ao uso da água