



Marcos Santos/USP Imagens

Reúso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes

Ivanildo Hespanhol

resumo

Além dos poluentes tradicionais, os mananciais disponíveis para abastecimento de água contêm poluentes emergentes, tanto químicos como biológicos. Sistemas convencionais de tratamento de água e de esgoto utilizados no Brasil não são suficientes para gerar efluentes com qualidade necessária para produzir água de reúso para fins potáveis. Como o reúso potável passará a ser, inexoravelmente, um instrumento fundamental de gestão de recursos hídricos em áreas críticas, são propostos sistemas de tratamento avançados para fornecer água segura para o abastecimento público.

Palavras-chave: abastecimento de água; poluentes emergentes; sistemas avançados de tratamento; reúso potável.

abstract

Besides traditional pollutants, the sources of water available for public supply contain emerging pollutants, both chemicals and biological ones. Conventional water and wastewater treatment systems operating in Brazil are not able to generate effluents of sufficient quality to be used as sources of drinking water. Since potable reuse is poised to be a key tool for managing water resources in critical areas, advanced treatment systems are proposed to provide safe water for public supply.

Keywords: water supply; emerging pollutants; advanced treatment systems; potable reuse.

M

anancial protegido é o corpo hídrico que não recebe efluentes domésticos ou industriais ou quaisquer outros poluentes, tais como resíduos sólidos ou chorume. O conceito floresceu com os engenheiros do período vitoriano (junho de 1837 a janeiro de 1901) e foi consagra-

do no Brasil através de nossos luminares da engenharia sanitária, entre os quais Saturnino de Brito, José Martiniano de Azevedo Netto, Eduardo Riomey Yassuda, Odyer Sperandio, Lucas Nogueira Garcez, Aталpho Coutinho, Lincoln Continentino e muitos outros. Paulatinamente, o conceito foi ficando mais permissivo, sendo numa primeira fase considerados como protegidos aqueles que recebessem apenas esgotos domésticos, pois estariam isentos de micropoluentes complexos, orgânicos e inorgânicos característicos de efluentes industriais. Mesmo com a descoberta recente da presença de poluentes emergentes, contidos nos esgotos de origem doméstica, os mananciais que os recebem continuaram a ser considerados adequados, levando ao esquecimento definitivo do conceito de manancial protegido. Chegamos, portanto, a uma estratégia esdrúxula de gestão de recursos hídricos no que concerne ao mais nobre dos usos da água, pois qualquer manancial, independente

de seu nível de poluição, é considerado adequado para produzir água potável.

Por outro lado, não restam dúvidas de que mananciais protegidos, dentro desse conceito, se tornaram praticamente inexistentes, ficando pouco realista a ideia de que apenas esses possam ser utilizados para abastecimento público. A única solução possível é, portanto, a de proporcionar sistemas de tratamento compatíveis com os níveis de poluição atual dos mananciais disponíveis, isto é, evoluir dos sistemas tradicionais de filtração e desinfecção com cloro para sistemas avançados de tratamento.

Como, atualmente, as soluções para tornar o abastecimento de água sustentável em regiões com estresse hídrico incluem o reúso de água para fins potáveis, o emprego de sistemas modernos de tratamento se constitui em prática indispensável para a proteção da saúde pública de usuários dos sistemas públicos de distribuição de água.

O CENÁRIO POLUIDOR MODERNO

O cenário do abastecimento de água, principalmente nas grandes regiões metropolitanas e em áreas de estresse hídrico, é, atualmente, caracterizado por restrições relevantes, particularmente

IVANILDO HESPANHOL é professor titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Poli-USP e diretor do Centro Internacional de Referência em Reúso de Água (Cirra/IRCWR/USP).

as relativas à dificuldade em atender às demandas atuais, à crescente ocorrência de produtos químicos refratários e, recentemente, aos poluentes emergentes, nos quais se incluem fármacos, cosméticos, disruptores endócrinos e seus metabolitos, nanopartículas, *Cryptosporidium spp.*, *spp.*, etc. Como contrapartida positiva a essa nova dimensão poluidora, despontam novos critérios de gestão e novas tecnologias de tratamento e de reúso de água que, quando adotados, poderão trazer nova dimensão a esse cenário crítico de abastecimento público, tanto em termos de disponibilidade como em termos de preservação da saúde pública de seus usuários (Hespanhol, 2012).

Atualmente, são raras as exceções nas quais as fontes de água disponíveis não estejam submetidas a condições críticas de poluição, com poluentes tanto tradicionais como emergentes. Como agravante, os sistemas convencionais de tratamento para produção de água potável não acompanharam as características extremamente agressivas dos mananciais existentes. É muito provável que a prática do reúso potável direto ou indireto, que deverá concentrar tecnologias modernas de tratamento e sistemas avançados de gestão de riscos e de controle operacional, possa, mesmo com as reações psicológicas e institucionais que a constroem, se tornar a alternativa mais adequada para fornecer água segura.

Poluentes químicos emergentes

Uma enorme e variada quantidade de produtos e compostos químicos sintéticos que adentram o mercado consumidor continuamente termina em corpos hídricos que se constituem em nossas fontes de abastecimento de água. Esses compostos são originários da fabricação de medicamentos para uso humano e veterinário, cosméticos e artigos de perfumaria, sabões, sabonetes e detergentes sintéticos, fertilizantes, fungicidas, herbicidas, inseticidas e produtos de limpeza e de polimento, retardantes de chamas, surfactantes, nanopartículas e muitos outros.

Disruptores endócrinos

Alguns desses compostos químicos sintéticos ou naturais e seus metabolitos (compostos orgânicos, intermediários ou finais num processo de

metabolismo), que possuem potencial de alterar o funcionamento normal dos sistemas endócrinos, passaram a ser identificados como interferentes, desreguladores, perturbadores ou disruptores endócrinos. São definidos como “substâncias ou mistura de substâncias exógenas que alteram as funções de sistemas endócrinos, causando, conseqüentemente, efeitos adversos sobre a saúde de organismos sadios ou de seus descendentes ou (sub)populações” (WHO, IPCS, ILO, UNDP, 2002). Um dos mais importantes disruptores endócrinos sintéticos, o 17 α -etinilestradiol, é o principal componente estrogênico de pílulas anticoncepcionais. Detalhes sobre disruptores endócrinos podem ser encontrados em: Joohee et al. (2004), Mendes (2002), Gomes, Mark e Lester (2003) e Hespanhol (2012).

Disruptores endócrinos – DEs, tanto os naturais como os exógenos, e seus metabolitos são encontrados no meio ambiente, tendo sido amplamente identificados em efluentes de estações de tratamento de esgotos domésticos (ETEs) e industriais, em águas superficiais e subterrâneas e em água potável (Bila & Dezotti, 2003).

A literatura internacional faz referência a um grande número de trabalhos relatando a ocorrência de DEs em sistemas hídricos, entre os quais: no afluente da ETE próxima a Frankfurt (Ternes et al., 1998), no Rio Danúbio (Loos, Locoro & Contini, 2010), nos Estados Unidos (Kolpin et al., 2002; Huber et al., 2003), na Itália, em afluentes e efluentes de seis ETEs por lodos ativados (Kobis, Fregene, Ostia, Roma Sul, Roma Oeste e Roma Norte – Baronti et al., 2000), e na Região Metropolitana de Campinas (Ghiselli, 2006). Em São Paulo, foram encontrados estrogênios naturais e sintéticos no reservatório Guarapiranga (tomada de água da Estação de Tratamento de Água – ETA Alto da Boa Vista), no Rio Cotia (em um ponto a montante da estação de tratamento do Baixo Cotia) e do reservatório Billings (junto à estação elevatória de Pedreira).

Nanopartículas ou nanomateriais

Nanopartículas ou nanomateriais passaram recentemente a se constituir em poluentes emergentes com potencial para causar perturbações degenerativas sobre a saúde humana (Hussain

et al., 2009). Nanopartículas são definidas como dispersão de partículas ou partículas sólidas com diâmetros entre 1 e 100 nanômetros (1 nm = 10^{-9} m) que apresentam propriedades diferentes daquelas apresentadas pelos mesmos materiais em dimensões usuais. As características mais relevantes dessas partículas são tamanho, química de superfície, cristalinidade, morfologia, solubilidade, tendência a agregação, homogeneidade de dispersão e turbidez.

Diversas atividades industriais podem, eventualmente, causar contaminação de esgotos ou de mananciais utilizados para abastecimento de água com nanomateriais. Indústrias que operam na síntese e na manipulação de nanopartículas podem apresentar eventos de saúde ocupacional, particularmente em relação a problemas pulmonares. Diversas outras indústrias podem, indiretamente, provocar problemas de saúde pública associados ao emprego de nanomateriais. A indústria farmacêutica, por exemplo, dissolve, encapsula ou adere a matrizes de nanopartículas diversas drogas para consumo humano, devido à sua habilidade de agir por longos períodos em determinado órgão ou para carrear proteínas, peptídeos ou genes (Mohanraj & Chen, 2006).

Poluentes emergentes biológicos

Paralelamente ao crescimento de produtos químicos, diversos organismos patogênicos emergem ou reemergem após um longo período de inatividade em função de alterações ambientais, de comportamento humano ou de desenvolvimento tecnológico. Provocam doenças cujas incidências cresceram nas duas últimas décadas ou que apresentam potencial para crescer em futuro próximo. Há diversas categorias de poluentes emergentes, ou seja, microrganismos que são totalmente novos (como os vírus da imunodeficiência humana VIH-1 e VIH-2 e o da gripe aviária H5N1), os que já eram conhecidos e apenas recentemente foram considerados como patogênicos (como o *Helicobacter pylori*) ou os que já eram conhecidos mas apresentaram aumento de virulência (como o *Streptococcus pyogenes*) ou os que adquiriram resistência a antibióticos (como o *S. pneumoniae*, o *Mycobacterium tuberculosis*, o *Staphylococcus aureus* e o *Enterococcus faecium*). Diversas do-

enças que foram consideradas sob controle, tais como a tuberculose, a cólera, a febre amarela e a dengue, estão, atualmente, se disseminando em diversas regiões do mundo.

Em relação à água, dentre os mais importantes organismos patogênicos considerados como emergentes ou reemergentes, estão a *Legionella pneumophila*, que é associada a torres de resfriamento, sistemas de ar condicionado, umidificadores, etc. No que tange a sistemas de abastecimento público, os organismos mais importantes são os protozoários *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* (Korich, et al., 1990).

Cryptosporidium spp. (3 a 8 μ m) é um protozoário parasito de vertebrados, particularmente o *C. parvum*, que causa, no homem, diarreia aguda, dores abdominais, vômito e febre baixa (Cantusio Neto, 2004; Fayer & Ungar, 1986). *Giardia spp.* (8 a 17 μ m) é um protozoário flagelado parasito de mamíferos (inclusive o homem) que provoca diarreia e cólicas abdominais, podendo levar a perda de peso e desidratação.

REMOÇÃO DE POLUENTES EMERGENTES POR SISTEMAS TRADICIONAIS DE TRATAMENTO

A literatura internacional é prolífica em relatar as características e eficiências de remoção de poluentes emergentes, químicos e biológicos, tanto em estações de tratamento de água para abastecimento público como em estações de tratamento de esgotos domésticos. Alguns desses estudos e levantamentos são relatados em seguida.

Estações de tratamento de água para abastecimento público

Uma pesquisa desenvolvida na Alemanha (Karanis, Schoeen & Seitz, 1998) avaliou a presença de *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* em uma ETA convencional, coletando amostras de água bruta, água filtrada e água de lavagem de filtros. Na água tratada, 29,8% (14/47) das amostras foram positivas para *Cryptosporidium spp.* e 14,9% (7/47) delas foram positivas para

Giardia spp. Ambos os parasitos foram detectados em 100% das amostras coletadas de água de lavagem de filtros. Estudos efetuados na Universidade do Arizona (Korich, Schoeen & Seitz, 1990) verificaram a eficiência da aplicação de ozona e de dióxido de cloro e a pequena efetividade da aplicação de cloro e de cloraminas na inativação de oocistos de *Cryptosporidium parvum*. Nos Estados Unidos, um estudo efetuado em 100 mananciais superficiais para abastecimento de água indicou concentrações variando entre 0,5 e 117 oocistos de *Cryptosporidium spp.* por 100 litros de água com média aritmética de 10,2 por 100 litros (McTigue, Le Checallier & Clancy, 1996; Franco, 2007).

Um estudo amplo efetuado em São Paulo, avaliando duas estações de tratamento de água operadas pela Sabesp, designadas como ETA-A e ETA-B, mostrou a inconsistência com que sistemas convencionais de tratamento de água são capazes de eliminar oocistos de *Cryptosporidium spp.* (Muller, 1999) devido, certamente, às suas diminutas dimensões (3 a 8 µm) e a sua elevada resistência à ação do cloro.

Estações de tratamento de esgotos sanitários

Um monitoramento efetuado na Itália em seis ETEs mostrou a capacidade dos sistemas de lodos ativados avaliados de remover o potencial estrógeno de seus afluentes. Durante cinco meses de operação as remoções foram de 95% para estriol, 87% para estradiol, 85% de etinilestradiol, mas apenas 61% para estrona (Baronti, et al., 2000). Efluentes de sete ETEs foram avaliados no Reino Unido (Desbrow et al., 1998). Os esteroides estrona e 17β-estradiol foram identificados em todas as amostras coletadas, e o 17α-etinilestradiol foi identificado apenas nas estações de Naburn e Horsham.

No Brasil foram identificados DEs e produtos farmacêuticos em efluentes de ETEs, em águas superficiais e em água potável. Nos esgotos brutos da ETE Penha, no Rio de Janeiro, foram detectadas concentrações de 0,021 µg/l de 17β-estradiol e 0,040 µg/l de estrona, gerando, em conjunto, uma carga de 5 g/dia (Ternes et al., 1999).

OPERAÇÕES E PROCESSOS UNITÁRIOS POTENCIAIS PARA A REMOÇÃO DE POLUENTES EMERGENTES

As operações e processos unitários básicos que são utilizados para compor sistemas de tratamento avançados para fazer frente ao cenário poluidor moderno, ou seja, membranas, carvão ativado, carvão biologicamente ativado e processos oxidativos avançados, são apresentados a seguir (Huang, Dong & Tang, 1993). Constituem-se em unidades de tratamento consagradas, confiáveis e consistentes, dirigidas para a remoção de poluentes ou grupos de poluentes específicos. Outros processos e operações unitárias utilizados em engenharia sanitária, como coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção, equilíbrio químico, etc., são utilizados como unidades coadjuvantes de tratamento para a produção de água segura.

Sistemas de membranas

O mecanismo de remoção de disruptores endócrinos, que, geralmente, possuem massa molecular inferior às massas moleculares de corte de algumas membranas, está associado à adsorção no material em suspensão e na matéria orgânica presentes na água bruta e acumulada na superfície da membrana. As partículas de maiores dimensões, associadas aos DEs, têm, assim, a possibilidade de serem removidas com maior eficiência (Mulder, 1996).

Estudos piloto realizados em São Paulo no Centro Internacional de Referência em Reúso de Água (Cirra/IRCWR/USP) identificaram a presença de DEs em diversos reservatórios que abastecem a Região Metropolitana de São Paulo e verificaram o potencial de remoção de DEs e de microcistina através de um sistema de membranas de ultrafiltração, utilizando água dos reservatórios de Guarapiranga e Billings (Mierzwa, 2009). Num dos ensaios efetuados nessa unidade piloto, obteve-se eficiências médias de remoção de 95,6% e 94,2% para o 17β-estradiol e para o 17α-etinilestradiol, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios preliminares efetuados nos laboratórios

do Cirra, foi montada uma unidade piloto junto à captação de água da Sabesp, no reservatório Guarapiranga. A operação dessa unidade-piloto demonstrou uma eficiência superior a 76% na remoção de 17 α -etinilestradiol.

A Organização Mundial da Saúde – OMS avalia que, dependendo dos tipos de membranas utilizadas e de suas características operacionais, a remoção máxima de vírus, bactérias e protozoários pode ser superior 6,5, 7 e 8 ordens de magnitude, respectivamente (WHO, 2011).

Carvão biologicamente ativado – CBA

Unidades de carvão biologicamente ativado são sistemas utilizados em tratamento avançado de água, principalmente para remover material orgânico (geralmente biodegradável), material não orgânico (compostos estáveis e de difícil degradação) e organismos patogênicos, contidos em águas superficiais ou subterrâneas. A remoção de contaminantes é processada através de três mecanismos básicos: biodegradação, adsorção de micropoluentes e filtração de sólidos suspensos (Asano et al., 2007). Para uma remoção eficiente os filtros devem ser projetados com profundidade variando entre 2 m e 4 m, tempo de detenção de filtro vazio entre 15 e 20 minutos e operar com taxas de filtração entre 8 e 12 metros por hora (Sontheimer, 1979; Dussert & Van Stone, 1994; Hespagnol, 2009).

Processos oxidativos avançados – POAs

Processos oxidativos avançados envolvem a geração do radical livre hidroxila (OH $^\circ$), um oxidante forte com capacidade de oxidar compostos que não são passíveis de serem oxidados por oxidantes convencionais, tais como oxigênio, ozônio e cloro (Tchobanoglous & Burton, 2003). A importância de POAs em sistemas de reúso potável direto (RPD) é vinculada ao fato de que mesmo efluentes de sistemas de tratamento terciário (inclusive em permeados de sistemas de osmose reversa) podem conter traços de compostos orgânicos naturais ou sintéticos (Asano et al., 2007; Kolpin et al., 2002).

O radical hidroxila tem um elevado potencial de oxidação – 2,8 eV em comparação com o cloro

e o dióxido de cloro, com 1,36 e 1,50 elétron-volt, respectivamente (EPA, 1998).

Os sistemas POAs têm se mostrado como excelente tecnologia para tratamento de águas subterrâneas e superficiais para fins potáveis, efluentes industriais e chorume. Para tratamento de água potável, principalmente as que contêm DEs, a metodologia que se tem mostrado mais eficiente é a que emprega o sistema UV/H₂O₂ (Rosenfeldt & Linden, 2004), avaliando-se, em escala de laboratório, a degradação de três DEs encontrados em águas naturais (bisfenol, 17 α -etinilestradiol e estradiol) através de fotólise com UV (com lâmpadas de média e alta pressão) e de POA utilizando o sistema UV/H₂O₂. Em todos os ensaios efetuados foi constatado que o sistema POA utilizado foi muito mais eficaz em promover a efetiva degradação dos DEs estudados do que o sistema de fotólise, utilizando apenas UV. Estudos desenvolvidos em laboratório, (Huber et al., 2003) mostraram a eficiência de processos de ozonização e de POAs para a remoção eficiente de produtos farmacêuticos e DEs (bezafibrate, carbamezepine, diazepam, diclofenac, ibuprofen, iopromide, sulfamethoxazole, roxitromicina e 17 α -etinilestradiol) presentes em águas naturais.

REÚSO POTÁVEL DIRETO – O DESAFIO DOS POLUENTES EMERGENTES

A técnica de reúso potável direto, pelo fato de empregar tecnologia e sistemas de controle e de certificação modernos, proporcionará, certamente, melhores benefícios em termos de saúde pública do que o emprego das tecnologias de tratamento convencionais em prática para tratar água oriunda de mananciais extremamente poluídos contendo altas concentrações de esgotos domésticos e industriais.

SISTEMAS DE REÚSO POTÁVEL

Sistemas de reúso potável podem ser concebidos como “reúso potável indireto não planejado”, “reúso potável indireto planejado” e “reúso potável direto”.

Reúso potável indireto não planejado – RPINP

Sistemas de reúso indireto não planejado e, na grande maioria das vezes, inconsistentes são praticados extensivamente no Brasil. Exemplos típicos são os lançamentos de esgotos (tratados ou não) e a coleta a jusante para tratamento e abastecimento público, praticados em cadeia, por diversos municípios, ao longo do Rio Tietê e do Rio Paraíba do Sul.

Um esquema ilustrativo de sistema de reúso indireto não planejado é mostrado na Figura 1.

Reúso potável indireto planejado – RPIP

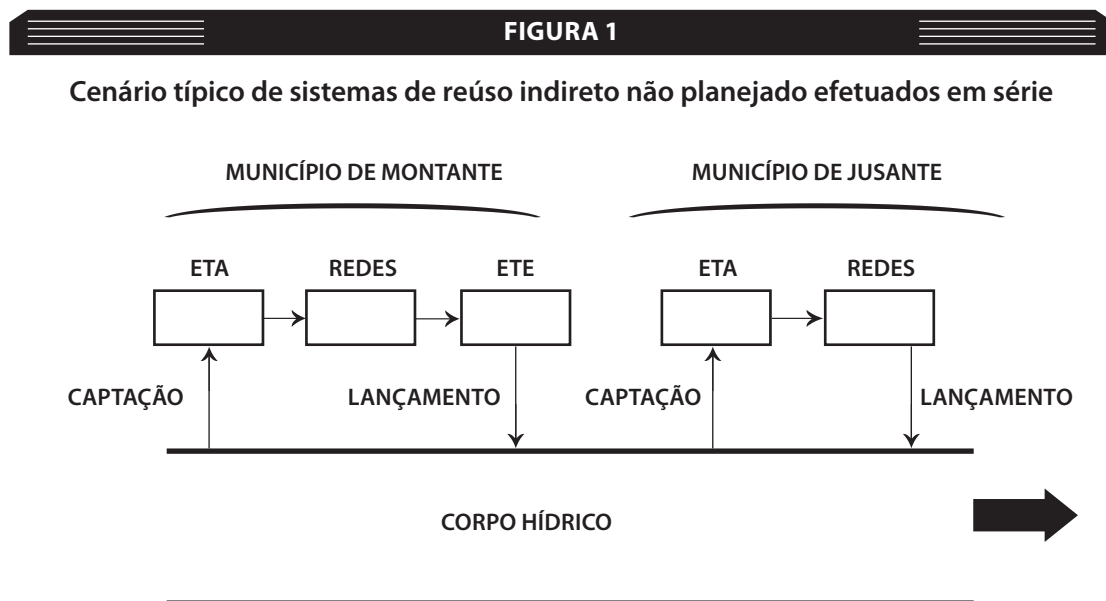
Conceitualmente, o reúso potável indireto planejado deve ser constituído por um sistema secundário de tratamento de esgotos, geralmente de lodos ativados e, mais modernamente, de sistemas de biomembranas submersas (iMBRs), seguido de sistemas de tratamento avançado e, se necessário, de um balanceamento químico antes do lançamento em um corpo receptor, superficial ou subterrâneo, aqui designados como atenuadores ambientais (AAs), como mostrado esquematicamente na Figura 2.

Os AAs podem ser corpos hídricos naturais associados aos sistemas de reúso potável di-

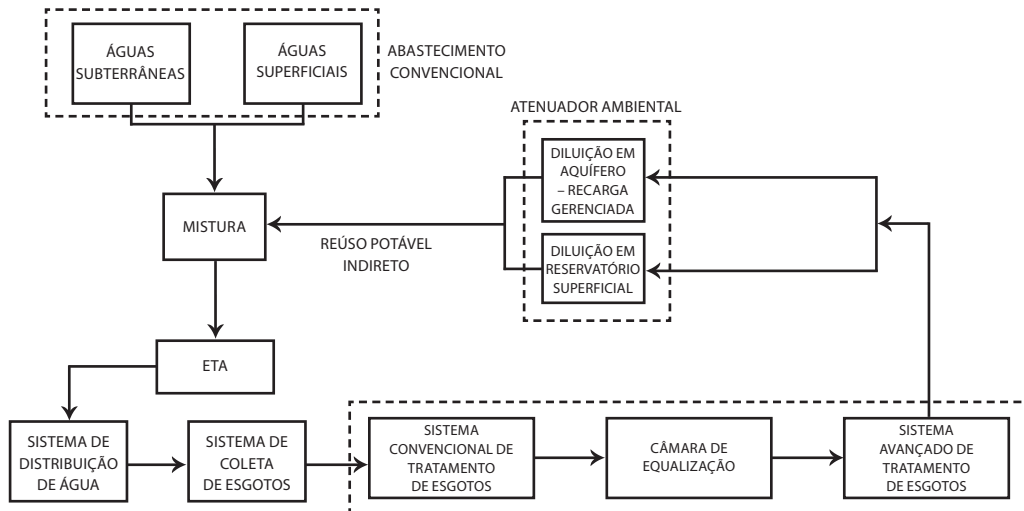
reto planejado. Podem, também, ser aquíferos não confinados, nos quais a recarga gerenciada é efetuada com os esgotos tratados, ou corpos receptores naturais, rios, lagos ou reservatórios construídos para regularização de vazões, tomada de água, geração de energia elétrica ou usos múltiplos, nos quais os esgotos tratados são lançados e posteriormente captados para reúso indireto. Os AAs, tanto subterrâneos como superficiais, têm o objetivo de, por efeitos de diluição, sedimentação, adsorção, oxidação, troca iônica, etc., atenuar as baixas concentrações de poluentes remanescentes dos sistemas avançados de tratamento utilizados. A legislação do estado da Califórnia (CDPH, 2008), para a recarga gerenciada de aquíferos (que poderia ser avaliada e adaptada para condições brasileiras), por exemplo, estabelece uma retenção de seis meses, baseada na hipótese de que cada mês de retenção proporciona a redução de 1 log (99%) de vírus, obtendo no período total uma redução correspondente a 6 logs (99,9999%).

O reúso potável direto planejado é difícil – se não impossível – de ser aplicado nas condições atuais brasileiras devido às seguintes características técnicas, ambientais, legais e institucionais:

- os corpos receptores superficiais que poderiam operar como atenuadores ambientais são geralmente poluídos, não possibilitando os efeitos purificadores adicionais desejados;



Esquema básico de um sistema de reúso potável indireto planejado



Fonte: adaptado de Tchobanoglous et al. (2011)

• por desconhecimento da importância e benefícios inerentes, a prática de recarga gerenciada de aquíferos é, formalmente, rejeitada por nossos legisladores e por alguns órgãos de fomento, que vêm, continuamente, recusando o desenvolvimento de estudos e projetos, que dariam subsídios para o desenvolvimento de uma norma e de códigos de prática nacionais sobre o tema (Hespanhol, 2009).

Verifica-se, portanto, que a implantação de sistemas de reúso potável indireto planejado não tem, atualmente, condições técnicas e de saúde pública de ocorrer em grande parte do Brasil, inclusive na RMSP.

Há uma enorme gama de sistemas de RPIs planejados, tanto experimentais como públicos, operando em diversos países. Um sistema administrado pela Companhia Intermunicipal de Água Veurne-Ambacht (IWVA), em Koksijde, no extremo norte da Bélgica, está em operação desde julho de 2002. A ETE de Wulpen, constituída por um sistema de lodos ativados, foi construída em 1987 e reformada em 1994 para proporcionar remoção de nutrientes. O efluente da ETE Wulpen é encaminhado à estação de tratamento avançado de Torreele, onde passa por unidades de ultrafiltração (ZeeWeed, ZW 500C da Zenon) e, em seguida, por unidades de osmose

reversa (30LE-440 da Dow Chemical). O efluente da ETA de Torreele é, após um transporte de aproximadamente 2,5 quilômetros, infiltrado no aquífero arenoso, não confinado, de Saint André, com o objetivo de remover organismos patogênicos e traços de produtos químicos que possam ter ultrapassado a barreira de osmose reversa. A água é recuperada do aquífero a distâncias variando entre 33 e 153 metros do ponto de recarga, através de 112 poços, a profundidades variando entre 8 e 12 metros. O extensivo sistema de monitoramento efetuado mostrou a excelente qualidade da água potável produzida. As análises efetuadas em 2007 nos efluentes do sistema de osmose reversa indicaram a ausência de produtos farmacêuticos quimicamente ativos e de DEs acima dos limites de detecção de 0,5 a 10 ng/L (Van Houtte & Verbauwhe, 2008; Vandenbohede, Van Houtte & Lebbe, 2008).

Um dos maiores e mais conhecidos sistemas de reúso potável indireto planejado é o de Orange County, situado em Fountain Valley, na Califórnia.

O efluente da ETE do Orange County Sanitation District é encaminhado, sem desinfecção, à estação de tratamento avançado do Water Factory 21, pertencente ao Orange County Water District, cuja produção é de aproximadamente 82 milhões de metros cúbicos por ano. O sistema antigo de tratamento, que era composto de sistema de coagu-

lação/floculação com cal, extração de amônia, recarbonatação, filtração, adsorção em carvão ativado, desinfecção e osmose reversa (Tchobanoglous & Burton, 1991), foi substituído, a partir de 2008 e após extensivos estudos piloto, por um sistema de tratamento que inclui microfiltração, osmose reversa, processo oxidativo avançado, osmose reversa em três estágios e desinfecção. Parte da água produzida é dirigida às bacias de infiltração de Kraemmer e Miller e parte aos poços de injeção, utilizados para evitar a penetração da cunha salina no aquífero costeiro, ao longo da Ellis Avenue.

Reúso potável direto – RPD

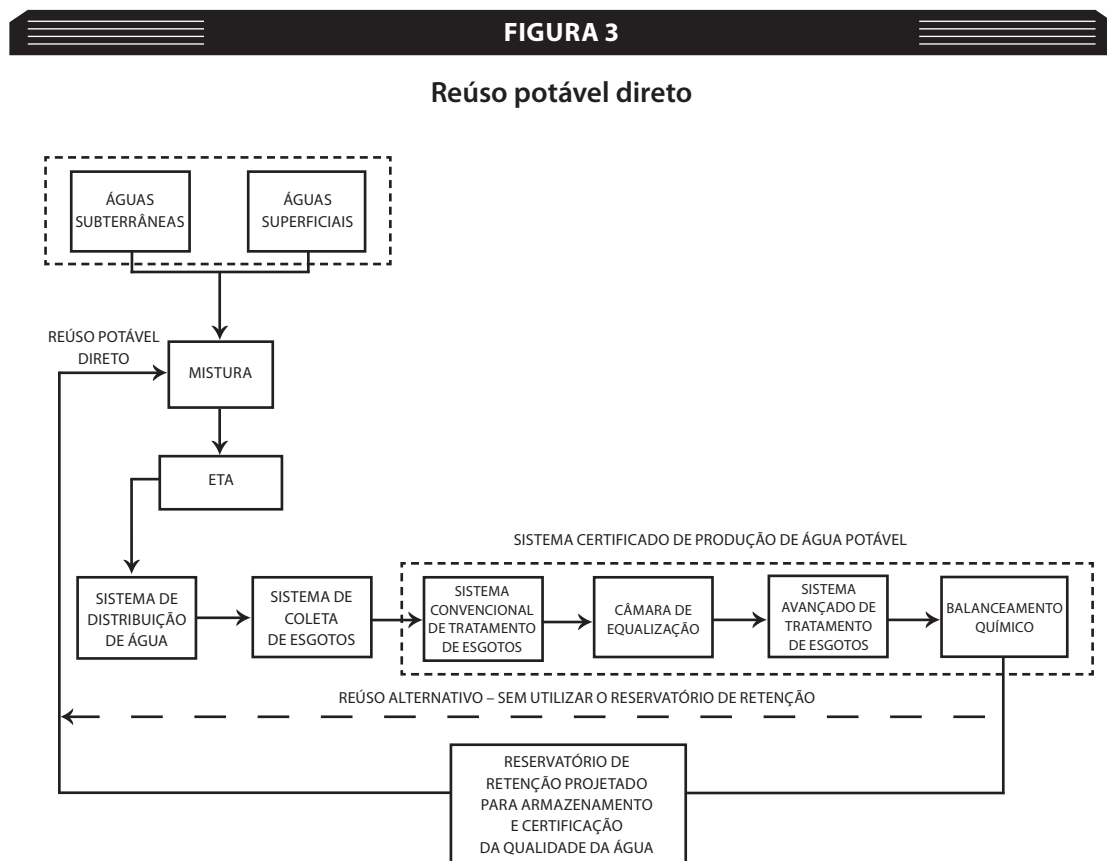
Reúso potável direto consiste no tratamento avançado de efluentes domésticos e a sua introdução em uma ETA cujo efluente adentra, diretamente, um sistema público de distribuição de água, sem que ocorra a passagem através de atenuadores ambientais, tanto superficiais como subterrâneos. O esgoto, após tratamento avançado, poderá ser introduzido diretamente em uma ETA ou em um reser-

vatório de mistura a montante dela quando vazões complementares, tanto de origens superficiais como subterrâneas, compõem a vazão total a ser tratada no sistema de reúso (Hespanhol, 2015)

Conforme mostrado na Figura 3, após tratamento secundário (sistemas convencionais ou sistemas MBRs), os esgotos passariam por câmara de equalização, por um sistema de tratamento avançado e por uma eventual câmara para balanceamento químico, em seguida por reservatório de retenção, antes de serem encaminhados à ETA, após mistura a ser efetuada com águas superficiais e/ou subterrâneas.

A necessidade de balanço químico deverá ser verificada quando não ocorrer a complementação com fontes superficiais ou subterrâneas ou quando a porcentagem de água de reúso for bastante elevada. Nesse caso, pode ser conveniente efetuar a remineralização da água para evitar problemas de saúde pública, melhorar o gosto e prevenir corrosão a jusante.

O reservatório de retenção pode ser natural (um pequeno lago ou reservatório isolado) ou construí-



Fonte: adaptada de Tchobanoglous et al. (2011)

do. Deve ser adequadamente projetado para servir como um sistema intermediário entre o sistema de tratamento de esgotos e o sistema de tratamento de água potável. Se o sistema envolver um grau significativo de variabilidade no sistema de tratamento de esgotos, esse reservatório deverá ser de dimensões relativamente elevadas, permitindo tempo suficiente para responder às eventuais deficiências do processo e efetuar uma certificação extensiva do efluente produzido. Caso o sistema apresente um elevado grau de confiabilidade, o reservatório de retenção poderá ter dimensões reduzidas ou mesmo não ser incluído no sistema de reúso.

Os objetivos básicos dos reservatórios de retenção e certificação são os seguintes:

- compensar a variabilidade entre a produção e a demanda de água;
- compensar a variabilidade da qualidade da água produzida;
- proporcionar um mínimo de tempo para detectar e atuar sobre as eventuais deficiências de processo antes da introdução da água tratada no sistema de distribuição.

A Figura 4 mostra, esquematicamente, um sistema de certificação que inclui três reservatórios

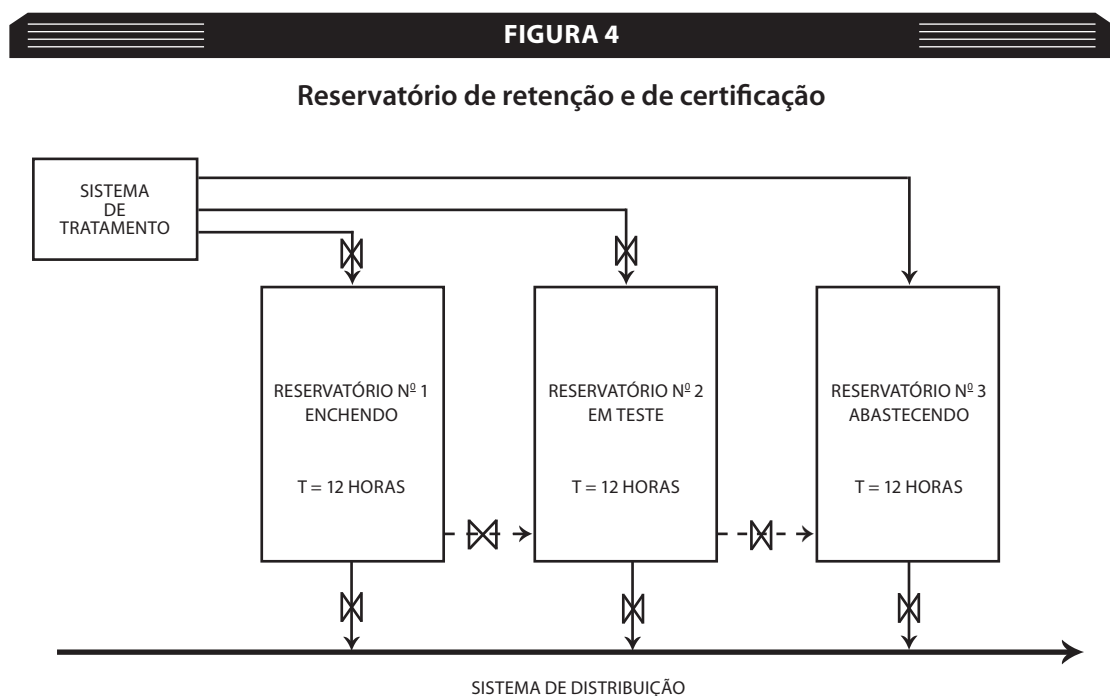
dispostos em série, cada um com volume de água potável equivalente a 12 horas de produção do sistema avançado de tratamento.

TECNOLOGIA DISPONÍVEL PARA REÚSO POTÁVEL DIRETO

A questão adjacente que ainda perdura em muitos setores conservativos é se há, atualmente, disponibilidade de tecnologia adequada (operações, processos unitários e sistemas integrados) e técnicas de certificação da qualidade de água que permitam produzir, consistentemente, água segura a partir de esgotos domésticos, respeitando critérios econômicos e de proteção da saúde pública dos consumidores. São apresentados os sistemas potenciais de tratamento que poderão ser avaliados para produzir, consistentemente, água de reúso para fins potáveis, em sistemas diretos.

Sistemas avançados de tratamento para RPD

O sistema avançado de tratamento deverá ser concebido em função das características do esgoto



Fonte: adaptado de ATSE (2013)

a ser tratado e da qualidade de eventuais fontes adicionais de água que serão tratadas na ETA. Dependendo da qualidade dessas fontes extras (presença de produtos químicos e de organismos patogênicos tais como oocistos de *Cryptosporidium spp.*), a ETA deverá, também, conter sistemas avançados de tratamento, tais como ultrafiltração e processos oxidativos avançados – POAs.

Considerando a elevada capacidade de remoção de poluentes críticos dos processos unitários acima descritos, os sistemas de tratamento para RPD a ser considerados para avaliação, em função de efluentes específicos e de características locais, são os dois esquematizados na Figura 5.

O sistema *a* é composto de unidades de osmose reversa (com pré-tratamento por ultrafiltração), e de POA, através de UV/H₂O₂. O sistema *b* integra unidades de ultrafiltração, carvão biologicamente ativado com ozona, nanofiltração e POA, através de UV/H₂O₂. Em ambos os sistemas mostrados na Figura 5, o efluente tratado passa pelo reservatório de retenção/armazenamento/certificação, pela câmara de mistura e, finalmente, pela ETA, produzindo água potável.

A EXPERIÊNCIA MUNDIAL EM REÚSO POTÁVEL DIRETO

Assim como acontece com os sistemas de reúso potável indireto planejado, há uma significativa

quantidade de sistemas de reúso potável direto implantados em diversos países. Alguns desses exemplos são mostrados a seguir.

Windhoek, Namíbia

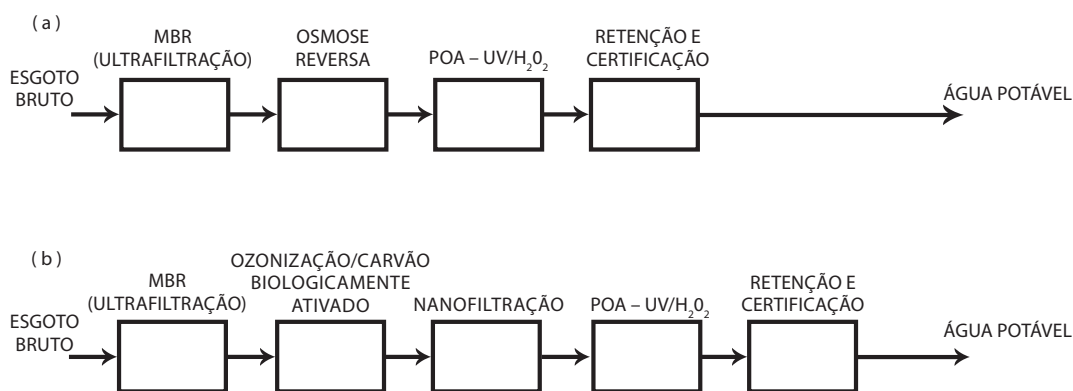
O reúso potável direto vem sendo praticado há mais de 40 anos, sem que problemas de saúde pública associados à água potável tenham sido identificados (Van der Merwe et al., 2008). Além de um completo sistema de monitoramento da qualidade da água, é utilizado o princípio de pontos críticos de controle (Damikouka, Katsiri & Tzia, 2007), o que traz uma maior segurança de saúde pública aos usuários do sistema.

Cloudcroft, Novo México, EUA

A pequena vila de Cloudcroft, no Novo México, tem uma população de aproximadamente 850 habitantes, que cresce para mais de 2 mil durante fins de semana e feriados. Nessas ocasiões a demanda de água passa de aproximadamente 680 m³/dia para um pico próximo a 1.360 m³/dia. Visando a eliminar o transporte de água através de caminhões-pipa durante os picos de consumo, a comunidade decidiu aumentar a disponibilidade de água através de um sistema de RPD, utilizando os esgotos domésticos produzidos localmente (Tchobanoglous et al., 2011).

FIGURA 5

Sistemas avançados de tratamento para reúso potável



Fonte: adaptado de Tchobanoglous et al. (2011) e de Leverenz et al. (2011)

Big Springs, Texas, EUA

Embora o reúso de água seja praticado na região desde há muito tempo, o Colorado River Water District, que abastece várias comunidades da região, inclusive Big Springs, tomou, recentemente, a decisão de “reciclar 100% da água, durante 100% do tempo”. O primeiro projeto de reúso associado a essa diretriz foi o de Big Springs (Tchobanoglous et al., 2011).

Beaufort West, África do Sul

A estação de tratamento avançado de Beaufort West recebe efluentes tratados por sistemas terciários convencionais das ETEs Northern e Kwa Mashu. Foi dimensionada para uma vazão de 2.100 m³/dia (ATSE, 2013) e é composta de ultrafiltração, osmose reversa, processo oxidativo avançado (peróxido de hidrogênio e UV) e desinfecção por cloro. Ela produzirá 1.000 m³/dia, que serão mesclados com água tratada pela ETA local de 4.000 m³/dia, produzindo, portanto, uma vazão total de 5.000 m³/dia (ATSE, 2013).

CONCLUSÕES

A mais importante das mudanças de paradigma que se fazem necessárias consiste em garantir o abastecimento de água em áreas submetidas a estresse hídrico através da promoção da prática de reúso potável direto.

As razões e as condições básicas que levarão a essa nova dimensão dos setores de saneamento e recursos hídricos são as seguintes:

- 1) os mananciais para abastecimento de água estão se tornando cada vez mais raros, mais distantes e mais poluídos;
- 2) o reúso potável indireto não planejado, extensivamente praticado no Brasil, é uma prática prejudicial tanto para o meio ambiente como para a saúde pública de usuários de sistemas de distribuição de água tratada através de sistemas convencionais;
- 3) a tecnologia avançada, hoje disponível, permite remover contaminantes, traços orgânicos e inorgânicos e organismos patogênicos, e produzir água de reúso segura;
- 4) a tecnologia de análise da qualidade da água produzida através de esgotos, hoje disponível, permite certificar que se pode produzir uma água segura para abastecimento público; não há necessidade de construir um sistema de distribuição separado para abastecer com água de reúso podendo se utilizar os sistemas de distribuição já existentes e suas extensões. No Brasil a avaliação vigente é de que os sistemas de distribuição implicam um custo equivalente a 2/3 do total dos custos associados a tratamento e distribuição. Uma avaliação efetuada nos Estados Unidos (Tchobanoglous et al., 2011) concluiu que o custo total de um sistema paralelo de distribuição de água potável, tratada em nível avançado, oscilaria entre US\$ 0,32/m³ e US\$ 1,70/m³, enquanto o de um sistema típico de tratamento avançado, incluindo sistemas de membranas e POA, oscilaria entre US\$ 0,57/m³ e US\$ 0,97/m³. A eliminação dos custos associados à construção de uma rede paralela para a distribuição de água de reúso compensaria os custos relativamente maiores (em relação a sistemas de tratamento convencionais), que seriam atribuídos ao sistema de tratamento avançado. Em alguns casos, como, por exemplo, na RMSP, que depende de importação de águas de bacias distantes, ter-se-ia, ainda, o benefício de evitar a construção de adutoras de água bruta, que implicam a aplicação de recursos elevados para construção, manutenção e recalque;
- 5) água de alta qualidade estaria disponível junto aos centros de consumo sem a necessidade de reversão de bacias. Seria utilizada a água disponível localmente sem prejudicar o abastecimento de água em bacias em condições de estresse crítico como, por exemplo, a bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).

RECOMENDAÇÕES

As companhias de saneamento e os centros de pesquisa certificados, incluindo os acadêmicos, deverão desenvolver estudos e pesquisas para:

- 1) avaliar técnica e economicamente operações e processos unitários, assim como sistemas de tratamento avançados para reúso potável direto, dentro das condições brasileiras;

- 2) avaliar a possibilidade e as implicações técnicas e econômicas para a utilização de redes existentes e suas extensões para efetuar a distribuição de água potável de reúso;
- 3) desenvolver programas educacionais e de conscientização para promover a aceitação pública para a prática de reúso potável direto. Argumentos relevantes são associados à garantia do abastecimento e ao fornecimento de água segura aos consumidores de sistemas públicos de abastecimento;
- 4) avaliar possibilidades de financiamento a empresas públicas e privadas que adotam a prática de reúso de água, como, por exemplo, a utilização dos fundos de garantia do tempo de serviço;
- 5) estabelecer critérios para subsidiar a prática de reúso de água, considerando a possibilidade de redução de taxas e impostos específicos.

BIBLIOGRAFIA

- ASANO, T. et al. *Water Reuse – Issues, Technologies, and Applications*. New York, Metcalf & Eddy/AECOM, 2007.
- ATSE – Australian Academy of Technological Sciences and Engineering. *Drinking Water Through Recycling – The Benefits and Costs of Supplying Direct to the Distribution System*. Melbourne, ATSE, 2013.
- BARONTI, C. et al. "Monitoring Natural and Synthetic Estrogens at Activated Sludge Sewage Treatment Plants and in a Receiving River Water", in *Environmental Science and Technology*, v. 34, 24, 2000, pp. 5.059-65.
- BILA, D. M.; DEZOTTI, M. "Fármacos no Meio Ambiente", in *Química Nova*, v. 26, n. 4, 2003, pp. 523-30.
- CDPH – California Department of Public Health. *Groundwater Recharge Reuse Draft Regulations*. Sacramento, California Health and Human Services Agency, 2008.
- CANTUSIO NETO, R. *Ocorrência de oocistos de Cryptosporidium spp. e cistos de Giardia spp. em Diferentes Pontos do Processo de Tratamento de Água em Campinas-SP*. Tese de mestrado. Campinas, Instituto de Biologia/Unicamp, 2004.
- DAMIKOUKA, I.; KATSIRI, A.; TZIA, C. "Application of HACCP Principles in Drinking Water Treatment", in *Desalination*, 210, 2007, pp.138-45.
- DESBROW, C. et al. "Identification of Estrogenic Chemicals in STW Effluent. 1. Chemical Fractionation and in Vitro Biological Screening", in *Environmental Science and Technology*, v. 32, n. 11, 1998, pp. 1.549-58.
- DUSSERT, B. W.; VAN STONE, G. R. "The Biological Activated Carbon Process for Water Purification", in *Water Engineering & Management*, v. 141, n. 12, 1994, pp. 22-4.
- EPA – Environmental Protection Agency. *Handbook on Advanced Photochemical Oxidation Processes*, EPA/625/R-98/004, Center for Environmental Research Information, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, December 1998, 97 p.
- FAYER, R.; UNGAR, B. L. P. "Cryptosporidium spp. and Cryptosporidiosis", in *Microbiological Reviews*, v. 50, n. 4, 1986, pp. 458-83, December;
- FRANCO, R. M. B. "Protozoários de Veiculação Hídrica: Relevância em Saúde Pública", in *Revista Panamericana de Infectología*, v. 9, n. 4, 2007, pp. 36-43.

- GOMES, R. L. "Determination of Endocrine Disrupters in Sewage Treatment and Receiving Waters", in *Trends in Analytical Chemistry*, v. 22, n. 10, 2003, pp. 597-707.
- HESPANHOL, I. "O Princípio da Prevenção e a Recarga Gerenciada de Aquíferos", in *Revista DAE*, n. 179. São Paulo, janeiro/2009, pp. 28-9.
- _____. "Poluentes Emergentes, Saúde Pública e Reúso Potável Direto", in Maria do Carmo Calijuri e Davi Gasparian Fernandes Cunha (coords.). *Engenharia Ambiental – Conceitos, Tecnologia e Gestão*. São Paulo, Elsevier Campus 2012, cap. 20, pp. 501-37.
- _____. "A Inoperabilidade do Reúso Potável Direto", in *Revista DAE*, janeiro-abril/2015, pp. 46-64.
- HUANG, C. P.; DONG, C.; TANG, Z. "Advanced Chemical Oxidation: Its Present Role and Potential Future in Hazardous Waste Treatment", in *Waste Management*, v. 13, 1993, p. 61-77.
- HUBER, M. M.; CANONICA, S.; PARK, G.; VON GUNTEN, U. "Oxidation of Pharmaceuticals During Ozonation and Advanced Oxidation Processes", in *Environmental Science and Technology*, v. 37, n. 5, 2003, pp. 1.016-24.
- HUSSAIN, S. M. et al. "Toxicity Evaluation for Safe Use of Nanomaterials: Recent Achievements and Technical Challenges", in *Advanced Materials*, 21, 2009, pp. 1.549-59.
- JOOHEE, J. et al. "Anti-estrogenic Activity of Fifty Chemicals Evaluated in Vitro Assays", in *Life Sciences*, v. 74, n. 7, 2004, pp. 3.065-74.
- KARANIS, P.; SCHOENEN, D.; SEITZ, H. M. "Distribution and Removal of *Giardias* and *Cryptosporidium* in Water Supplies in Germany", in *Water Science and Technology*, v. 37, n. 2, 1998, pp. 9-18.
- KOLPIN, D.W. et al. "Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999-2000: A National Reconnaissance", in *Environmental Science and Technology*, v. 36, n. 6, 2002, pp. 1.202-11.
- KORICH, D. J. et al. "Effects of Ozone, Chlorine Dioxide, and Monochloramine on *Cryptosporidium parvum* Oocyst Viability", in *Applied and Environmental Microbiology*, v. 56, n. 5, 1990, pp. 1.423-28.
- KREUZINGER, N. et al. *Investigation on the Behaviour of Selected Pharmaceuticals in the Groundwater after Infiltration of Treated Wastewater*. Viena, University of Technology, 2006.
- LEVERENZ, H. L.; TCHOBANOGLOUS, G.; ASANO, T. "Direct Potable Reuse: a Future Imperative", in *Journal of Water Reuse and Desalination*, v. 1, n. 1, IWA Publishing march, 2011, pp. 2-10.
- LOOS, R.; LOCORO, G.; CONTINI, S. "Occurrence of Polar Organic Contaminants in The Dissolved Water Phase of the Danube River and its Major Tributaries Using SPE-LC-MS2 Analysis", in *Water Research*, 44, 2010, pp. 2.325-35.
- McTIGUE, N.; LE CHECALLIER, M. W.; CLANCY, J. "Finding of the National Counting Project", in *Proceedings of the AWWA Annual Conference*, Toronto, 1996.
- MENDES, J. J. A. "The Endocrine Disruptors: a Major Medical Challenge", in *Food and Chemical Toxicology*, 40, Pergamon Press, 2002, pp. 781-8.
- MIERZWA, J. C. *Desafios para o Tratamento de Água de Abastecimento e o Potencial de Aplicação do Processo de Ultrafiltração*. Tese de livre-docência. São Paulo, Poli-USP, 2009.
- MOHANRAJ, V. J.; CHEN, Y. "Nanoparticles-A Review", in *Tropical Journal of Pharmaceutical Research* 5 (1), 2006, pp. 561-73.
- MULDER, M. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd ed. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996.

- MULLER, A. P. B. *Detecção de Oocistos de Criptosporidium spp. em Águas de Abastecimento Superficiais e Tratadas na RMSP*. Tese de mestrado. São Paulo, Instituto de Ciências Biomédicas da USP, 1999.
- ROSENFELDT, E. J.; LINDEN, K. G. "Degradation of Endocrine Disrupting Chemicals- bisphenol A, Etilnil Estradiol, and Estradiol During UV Photolysis and Advanced Oxidation Processes", in *Environmental Science and Technology*, v. 38, n. 20, 2004, pp. 5.476-83.
- SONTHEIMER, H. "Design Criteria and Process Schemes for GAC Filters", in *J. AAWA*, v. 71, n. 11, 1979, pp. 618-27.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L. *Wastewater Engineering – Treatment Disposal and Reuse*. 3th. New York, Metcalf & Eddy, 1991.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; LEVERENZ, H.; NELLOR, M. H. N.; CROOK, J. *Direct Potable Reuse – A Path Forward*. Water Reuse Research Foundation, 2011.
- TERNES, T. A. et al. "Behavior and Occurrence of Estrogens in Municipal Sewage Treatment Plants – I. Investigations in Germany, Canada and Brazil", in *The Science of the Total Environment* 225, Elsevier Science, 1999, pp. 81-90.
- VANDENBOHEDE, A.; VAN HOUTTE, E.; LEBBE, L. "Groundwater Flow in the Vicinity of Two Artificial Recharge Ponds in the Belgian Coastal Dunes", in *Hydrology Journal*, 2008, pp. 1.669-81.
- VAN DER MERWE, B.; DU PISANI, P.; MENGE, J.; KÖNIG, E. "Water Reuse in Windhoek, Namibia: 40 Years and Still the Only Case of Direct Water Reuse for Human Consumption", in Blanca Jimenez; Takashi Asano (eds.). *Water Reuse-An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*. London, IWA Publishing, 2008, pp.434-54, chapter 24.
- VAN HOUTTE, E., VERBAUWHEDE, J. "Operational Experience with Indirect Potable Reuse at the Flemish Coast", in *Desalination*, n.218, issues 1-3, 2008, pp.198-207.
- WHO, IPCS, ILO, UNDP. *Global Assessment of the State-of-the-Science of Endocrine Disruptors*. Edited by Terri Damstra, Sue Barlow, Aake Bergman, Robert Kavlock, Glen Van Kraak. World Health Organization, International Programme on Chemical Safety, International Labor Organization, EHO/PCS/EDC/02.2. Geneva, Switzerland, 2002.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for Drinking Water Quality*. 4th ed. Geneva, Switzerland, 2011.