Cianobactérias em Mananciais de Abastecimento – Problemática e Métodos de Remoção

Cyanobacteria in Water Sources of Supply – Problems and Removal Methods

Flávio Rubens Lapolli *

Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (UFSC). Engenheiro Civil (UFSC), Engenheiro Sanitarista pela Universidade de São Paulo (USP), Mestre em Engenharia de Produção (UFSC) e Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento (USP).

Lucila Adriani Coral

Doutoranda em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Tecnóloga em Química Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Mestre em Engenharia Ambiental (UFSC).

María Ángeles Lobo Recio

Professora do Departamento de Engenharia de Energia na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Química pela Universidad Complutense de Madrid (UCM). Doutora em Química pela (UCM). Pós-Doutorado na Universidade de Montpellier II – França e Conselho Superior de Investigación Científica (CSIC) – Espanha.

Endereço *: Campus Universitário S/N - Trindade - Florianópolis - SC - CEP: 88010- 970 - Brasil - Tel: (48) 3721-9821. E-mail: frl@ens.ufsc.br

Data de Entrada:
19-11-2009

Data de Aprovação:
28-07-2010

RESUMO

O constante aumento nas ocorrências de florações de cianobactérias em ambientes aquáticos, em especial em mananciais de abastecimento, reflete o desequilíbrio ambiental desse ecossistema, decorrente, em maior grau, das atividades antrópicas. A presença excessiva desses organismos, além de causar alterações organolépticas na água e dificuldades operacionais nos sistemas de tratamento empregados, traz como maior preocupação, a capacidade de produção de substâncias potencialmente tóxicas para a saúde humana e de animais por estes organismos. Casos de intoxicação por cianotoxinas têm sido freqüentemente relatados e, neste sentido, a adoção e o conhecimento de processos de tratamento de água eficazes na remoção destes organismos e de seus metabólitos tornam-se de extrema importância quando se considera a manutenção da saúde pública.

ABSTRACT

The constant increase of occurrences of the cyanobacterial blooms in aquatic environments (especially in supplied water sources) reflects the environmental imbalance of this ecosystem. This is due to a great degree to human activities. As well as organoleptic changes in water and operational difficulties in the treatment systems, the excessive presence of these organisms brings the main concern of its ability to produce substances potentially toxic to animal and human health.

Cases of cyanotoxin poisoning have often been reported. The adoption and process knowledge of water treatments effective for the removal of these organisms and their metabolites therefore becomes extremely important when considering the maintenance of public health.

PALAVRAS-CHAVE: cianobactérias; cianotoxinas; mananciais de abastecimento; tratamento de água.

KEYWORDS: cyanobacteria; cyanotoxins; sources of supply; water treatment.

INTRODUÇÃO

Cianobactérias, conhecidas popularmente como cianofíceas ou algas azuis, são microrganismos procariontes e autotróficos encontrados em diferentes habitats. Por serem procariontes, mostram-se bioquimicamente e estruturalmente semelhantes às bactérias. Entretanto, são similares as algas em relação ao tamanho e por possuírem pigmentos que as tornam capazes de realizar fotossíntese (WHO, 1998), sendo este seu principal modo de obtenção de energia para o metabolismo.

Assim como outros organismos aquáticos, as cianobactérias apresentam uma atuação indispensável para a manutenção dos ecossistemas, sendo consideradas como os mais antigos organismos produtores de oxigênio, cujos fósseis remontam aproximadamente 3,5 bilhões de anos (Schopf, 2000 apud Paerl e Huisman, 2009). Recentemente, um dos graves problemas associados à presença desses organismos é a ocorrência de florações, o que resulta principalmente, em função da contaminação dos corpos hídricos. Como destacam Paerl e Huisman (2009), as mudanças ambientais induzidas pelo homem, principalmente em relação ao aporte de nutrientes nos corpos d'água, particularmente nitrogênio e fósforo, associado com o desenvolvimento urbano, agrícola e industrial, tem contribuído com a aceleração das taxas de produção primária ou eutrofização. Os mananciais de abastecimento têm se tornado, nos últimos anos, um ambiente de destaque quanto à ocorrência de florações de cianobactérias, visto a reduzida qualidade das águas destinadas ao abastecimento. Esse comportamento tem sido observado no âmbito global, em termos de frequência, duração e severidade.

A problemática associada com a presença de cianobactérias em mananciais de abastecimento é relacionada, a um primeiro momento, aos aspectos estéticos e organolépticos, pouco agradáveis e aos problemas operacionais no sistema de tratamento de água, em que se verifica uma visível do sistema de filtração e, conseqüente, menor eficiência do processo. No entanto, a principal preocupação verificada é a capacidade de algumas espécies de cianobactérias e cianotoxinas em produzir toxinas, denominadas cianotoxinas, as quais podem, em função da concentração, atingir severamente tanto homens quanto animais. Na Figura 1 são destacados alguns países em que se verificou a ocorrência de florações de cianobactérias associada a presença de cianotoxinas (Carmichael, 2008).

Figura 1 – Países onde florações aquáticas de cianobactérias produzindo cianotoxinas foram documentadas (Carmichael, 2008).

Estratégias adaptativas de crescimento das cianobactérias e a sua presença em mananciais de abastecimento

As cianobactérias apresentam características ecológicas que lhes permitem colonizar a maior parte dos habitats, aquáticos ou terrestres, podendo ser livres ou viver em simbiose com outros organismos. Um grande número destes organismos pode se adaptar a ambientes extremos (geleiras, fontes quentes, cinzas vulcânicas), em baixo valor de pH (em torno de 4), e em elevada ou reduzida luminosidade. No meio aquático, podem ser planctônicas, vivendo em suspensão na coluna d'água, ou bentônicas, quando se desenvolvem fixas ao sedimento (França, 2006). Morfologicamente, as cianobactérias podem ser encontradas na forma unicelular (*Synechocystis*, *Synechococcus*), colonial (*Microcystis*) e filamentosa (*Cylindrospermopsis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*). Na Figura 2 podem ser observadas algumas espécies exemplares quanto a morfologia.

Ao contrário da maioria das algas, muitas espécies de cianobactérias podem se acumular na superfície da água, formando escumas, frequentemente denominadas “blooms”, apresentando densidade de células extremamente elevada (WHO, 1998). Como destaca Sant’Anna et al. (2008), espécies planctônicas de cianobactérias são intensivamente favorecidas pelas condições ambientais resultantes do processo de eutrofização, tais como, a baixa transparência da água, altos valores de pH (entre 6 e 9), elevada concentração de nutrientes, temperatura da água entre 25 e 30 °C, e alta incidência luminosa, principalmente em regiões tropicais.

O sucesso competitivo das cianobactérias em relação a outras espécies é baseado em estratégias fisiológicas e adaptativas ecologicamente (Sant’Anna et al., 2008). São reconhecidos neste sentido, a capacidade de várias espécies

de cianobactérias em ajustar sua flutuabilidade, por meio de vesículas de gás, buscando condições do meio mais favoráveis ao seu crescimento, principalmente em relação à intensidade luminosa; afinidade destes organismos por fósforo e nitrogênio, nutrientes geralmente limitantes no crescimento; capacidade em armazenar importantes quantidades de fósforo para posterior utilização, e de certas espécies em fixar o nitrogênio atmosférico (Robert; Tremblay; Deblois, 2005). Em condições limitadas de nitrogênio, mas com outros nutrientes disponíveis, o crescimento e a reprodução das cianobactérias são possibilitados, o que favorece a floração de tais espécies em ambientes de água doce e em ambientes marinhos (Oliveira, 2005; Melo, 2006).

Figura 2 – Diferentes morfologias de cianobactérias

(<http://picsdigger.com/keyword/synechocystis/>; <http://picsdigger.com/keyword/synechococcus/>; <http://www-cyanosite.bio.purdue.edu/images/images2.html>; Prosab 4, 2006).

Um dos ecossistemas mais favoráveis à expansão das florações de cianobactérias no Brasil são os reservatórios de água, em geral, rasos e facilmente eutrofizados, além de apresentarem longos tempos de retenção (Sant’Anna et al., 2008). Esses fatores,

segundo Brasil (2003), intensificam a ocorrência de florações no país, uma vez que a maioria dos reservatórios de água apresenta tais características durante grande parte do ano. A disposição inadequada de rejeitos domésticos e industriais nos mananciais de abastecimento tem contribuído para que a ocorrência destes fenômenos seja cada vez mais comum nestes ambientes.

Yunes (2003) destaca ocorrências de florações de *Microcystis aeruginosa* na Lagoa dos Patos (RS – segundo maior manancial natural do Brasil) registradas desde 1987.

De acordo com o autor, normalmente as épocas de florações coincidem com o maior consumo de água, o que dificulta o tratamento e coloca em dúvida a sua eficiência quanto à remoção das células e das toxinas livres. No Rio Guaíba, maior manancial de abastecimento da cidade de Porto Alegre (RS), conforme destaca Maizonave et al. (2009), o monitoramento de florações de cianobactérias tem sido realizado desde a década de 1970. Em monitoramento realizado até o ano de 2007, os principais gêneros ou espécies observadas no Rio Guaíba foram *Anabaena sp.*, *Microcystis sp.*, *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Raphidiopsis*, *Aphanizomenon sp.* e *Planktothrix isoethrix*. Chaves et al. (2009), em monitoramento realizado entre os anos de 2005 e 2008 para avaliação da presença de cianobactérias tóxicas no Rio dos Sinos (RS), verificaram ao longo do período, concentrações elevadas de células de *Planktothrix sp.* e *Cylindrospermopsis sp.*, com presença de microcistinas e saxitoxinas, respectivamente. Os autores consideraram, dessa forma, que as florações observadas representam risco potencial à saúde humana, uma vez que os valores de densidade celular tenderam a ultrapassar muitas vezes, os valores máximos recomendados pela legislação brasileira (Brasil, 2004).

Os reservatórios Billings e Guarapiranga (São Paulo), que atendem cerca de três milhões de habitantes, têm apresentado recorrentes casos de florações de cianobactérias. Apesar de abrigar um dos mais importantes mananciais de abastecimento para a região metropolitana de São Paulo, a bacia do Guarapiranga vem sofrendo constante degradação ambiental, em que se verifica a ocupação crescente e desordenada da bacia, resultando em um aumento significativo da carga orgânica do manancial e, dessa forma, a eutrofização deste ambiente. No reservatório de Billings, mesmo tendo-se reduzido o aporte de águas poluídas provenientes dos rios Pinheiros e Tietê, a incidência de florações é constante (Lorenzi, 2004). De acordo com o autor, diferentes espécies de cianobactérias já foram isoladas da represa Billings, tendo sido isolada, pela primeira vez em 1996, a espécie de cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii*, frequentemente observada na represa e produtora de uma potente toxina. Molica et al. (2002), também destacam a predominância deste organismo durante o período de Novembro de 1997 a Outubro de 1998 no reservatório de Tabocas, em Pernambuco, tendo ocorrido uma floração massiva de Julho a Outubro de 1998. Outras ocorrências no Estado foram igualmente registradas. Sant’Anna et al. (2008) realizaram uma avaliação das ocorrências de diversas espécies de cianobactérias no Brasil, considerando as regiões tropical e subtropical do país e observaram que a região tropical apresenta menor biodiversidade de cianobactérias tóxicas (14 espécies) se comparado a região subtropical (27 espécies). Os autores concluíram ainda, que as cianobactérias *Microcystis aeruginosa* e *Cylindrospermopsis raciborskii* são as espécies tóxicas mais encontradas, ocorrendo em diferentes partes das áreas tropical e subtropical. Estudo realizado por Sant’Anna e Azevedo (2000), de acordo com dados da literatura, indicam com maiores detalhes os locais e características das espécies de cianobactéria potencialmente tóxicas encontradas no Brasil.

Além dos mananciais de abastecimento e corpos de água de

modo geral, outro ambiente propício à proliferação de cianobactérias são as lagoas de estabilização. Em lagoas facultativas (aeróbio-anaeróbio), em que se tem a decomposição da matéria orgânica pela ação de bactérias aeróbias, as quais recebem o oxigênio via fotossíntese algal e de cianobactérias, a presença destes organismos é de extrema importância para a manutenção das condições aeróbias do sistema (Furtado et al., 2009). A presença de nutrientes, elevada luminosidade e baixa movimentação do líquido, favorece o crescimento destes organismos nas lagoas de estabilização. Entretanto, em função da produção de toxinas por várias espécies de cianobactérias, o lançamento do efluente tratado contendo toxinas no corpo receptor pode vir a afetar a biota aquática, provocando alterações na cadeia alimentar por inibir o desenvolvimento de outras algas (Cruz et al., 2005). Furtado et al. (2009) destaca que ainda, poucos estudos têm sido realizados quanto a diversidade natural de cianobactérias em sistema de tratamento de águas residuárias por lagoas de estabilização, o que remete a preocupação, uma vez que as toxinas produzidas nestes sistemas podem ser lançadas juntamente com o efluente tratado em rios, canais de irrigação, estuários ou reservatórios de água.

Em virtude da elevada densidade de algas e cianobactérias nas lagoas de estabilização, estudos tem sido realizados visando a aplicação de processos físico-químicos no polimento para minimizar a incidência destes organismos. Como destaca Cruz et al. (2005), o tratamento físico-químico envolve normalmente uma etapa de coagulação-floculação, seguida por decantação ou flotação, as quais podem ser realizadas em unidades específicas, inseridas a jusante dos reatores biológicos ou dentro da própria lagoa. Os referidos autores observaram que após o tratamento físico-químico, o efluente apresentou redução significativa no número de indivíduos fitoplanctônicos, incluindo as cianobactérias. O mesmo comportamento foi observado por Godoy (2007) a partir do tratamento físico-químico empregado antes e após o sistema biológico.

Cianotoxinas e intoxicações humanas

O crescimento massivo de cianobactérias tende a causar sabor e odor desagradáveis à água, além de um desequilíbrio na comunidade fitoplanctônica local, uma vez que tendem a ser dominantes sobre outras espécies. O maior problema associado à presença desses organismos, entretanto, diz respeito a produção de toxinas (cianotoxinas) por estes organismos. Cianotoxinas são metabólitos secundários classificados de acordo com o órgão, tecido, célula ou sistema fisiológico primeiramente afetado por sua ação quando introduzidas no organismo (Martins et al., 2005), sendo responsáveis por intermitentes, mas repetidos envenenamentos generalizados de animais selvagens e domésticos, e peixes (Carmichael et al., 2001). Conforme destacam Sivonen e Jones (1999), embora sejam de origem aquática, a maioria das cianotoxinas já identificadas parece ser mais perigosa para os mamíferos terrestres do que para a biota aquática.

As cianotoxinas são normalmente classificadas em três grupos funcionais principais: hepatotoxinas, neurotoxinas e dermatotoxinas, das quais as hepatotoxinas e as neurotoxinas podem ser consideradas os principais agentes tóxicos produzidos.

São destacadas nesta classificação as neurotoxinas anatoxina-a e anatoxina-a(s), e as toxinas paralisantes (saxitoxina e seus análogos) e as hepatotoxinas microcistina, nodularina e cilindrospermopsina (Carmichael et al., 2001). Essas toxinas podem atuar no organismo causando morte por parada respiratória poucos minutos após a exposição (neurotoxinas) ou podem atuar mais

lentamente (hepatotoxinas).

Diferentes rotas de exposição podem permitir a intoxicação por cianotoxinas, dentre elas a exposição oral, considerando o consumo de água ou alimentos contaminados, como alguns frutos do mar, cujo crescimento se dá em águas com presença de cianobactérias e cianotoxinas, e exposição dérmica, podendo-se relacionar as atividades recreacionais em ambientes contaminados. De acordo com Carmichael et al. (2001), considerando que a maioria dos envenenamentos por cianotoxinas via exposição dérmica, ocorre somente quando da presença de escumas superficiais, poucos casos de intoxicações agudas em humanos são verificadas, uma vez que o contato com esses ambientes nestas condições é evitado. Além disso, com relação à água utilizada para abastecimento, busca-se a aplicação de processos de tratamento que sejam capazes de evitar a permanência das cianobactérias na água tratada, reduzindo, dessa forma, concentrações indesejáveis de cianotoxinas. Entretanto, as rotas de exposição oral e dérmica não são consideradas as únicas capazes de resultar em intoxicações graves para o homem.

A rota intravenosa, caracterizada pela exposição de pacientes de hemodiálise às cianotoxinas, pode ser considerada o primeiro diagnóstico da presença de cianobactérias e cianotoxinas em mananciais de abastecimento. Em Fevereiro de 1996, na cidade de Caruaru, em Pernambuco, foi registrado o primeiro caso comprovado de grave hepatotoxicose, seguida de morte, após submissão de pacientes a sessões de hemodiálise.

De acordo com Carmichael et al. (2001), 51 pacientes da clínica faleceram por volta do mês de Abril e um total de 76 mortes foram reportadas durante o período de estudo do evento (Outubro de 1997). Os estudos indicaram a presença das cianobactérias dos gêneros *Microcystis*, *Anabaena* e *Cylindrospermopsis*, tendo-se identificado a presença de diferentes variantes de microcistina e em pequena quantidade, de cilindrospermopsina no Açude Tabocas, o qual fornecia água para o reservatório da clínica. Ainda, doses elevadas de cianotoxinas foram encontradas no filtro de carvão ativado utilizado para a purificação da água na entrada da clínica (Carmichael et al., 2001). Este incidente, referenciado como Síndrome de Caruaru, contribuiu para que as cianotoxinas fossem incluídas no padrão de potabilidade brasileiro na Portaria n 1469/2000, do Ministério da Saúde, substituída posteriormente pela Portaria n 518/2004 (MELO, 2006). Pela legislação, as instituições responsáveis pelo tratamento e distribuição da água para consumo, devem monitorar a ocorrência de cianobactérias e cianotoxinas nos mananciais de abastecimento, de forma a implementar medidas mitigadoras ou corretivas. A Portaria n 518/2004, institui limite de concentração para a microcistina em 1,0 µg.L⁻¹ em água tratada e destinada ao abastecimento e recomenda limites de 15,0 µg.L⁻¹ e 3,0 µg.L⁻¹ para cilindrospermopsina e saxitoxina e congêneres, respectivamente.

Sivonen e Jones (1999) reportam outras ocorrências de intoxicações humanas com cianotoxinas, com datas antecedentes à Síndrome de Caruaru. O surto mais severo de toxicidade de cianobactérias em uma população humana ocorreu em uma ilha ao nordeste da costa da Austrália. Em razão da presença de sabor e odor desagradáveis na água de abastecimento, as autoridades responsáveis optaram por interromper a floração aplicando sulfato de cobre no manancial. Com isso, um elevado número de crianças desenvolveu severa hepatite e um total de 140 crianças e 10 adultos necessitaram de tratamento hospitalar. Neste evento, foi identificada a presença da cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii*. A introdução do algicida na água induziu ao rompimento das células e, conseqüentemente, a liberação das toxinas. Na legislação brasileira, a adoção de algicidas como método de controle de florações de

cianobactérias é vetada, assim como qualquer intervenção que induza a lise celular destes organismos quando a densidade de cianobactérias é superior a 20.000 cel.mL⁻¹ (Brasil, 2004).

No Brasil, em 1988, foi descrito um dos primeiros casos de morte humana por uma forte epidemia de gastroenterite, cuja causa mais provável foi relacionada à intoxicação com cianotoxinas. Neste incidente, em um período de 42 dias foram registrados cerca de 2000 casos da doença, com o falecimento de 88 pessoas, sendo na maioria crianças. O fato foi relacionado ao consumo de água do reservatório de Itaparica, no Estado da Bahia, cuja presença das cianobactérias *Anabaena* e *Microcystis* vinha sendo observada em densidade acima do habitual (Teixeira et al., 1993).

Processos de tratamento aplicados à remoção de cianobactérias e cianotoxinas em águas de abastecimento

A presença de algas e cianobactérias em mananciais destinados ao abastecimento de água resultam em dificuldades operacionais do sistema de tratamento empregado, devido, em maior grau, a resistência química de algumas espécies, morfologia e flutuabilidade das células. Além disso, deve-se considerar ainda a elevada solubilidade das cianotoxinas na água, que tendem a passar facilmente pelo sistema de tratamento (Brandão; Domingos, 2006), repercutindo em uma reduzida eficiência no processo.

Estudos com relação à remoção de células e subprodutos de cianobactérias, de uma forma geral, abordam as mais variadas tecnologias, desde as mais simplificadas, como a filtração lenta, e os processos convencionais, em que são consideradas as etapas de coagulação/floculação, decantação e filtração, até a adoção de etapas de pré e pós-oxidação utilizando cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio, entre outros oxidantes, e adsorção em carvão ativado (Sá, 2002; Mondardo, 2004; Sens et al., 2005; Qiao; Tao, 2005; Melo Filho, 2006). Ainda, outras tecnologias têm sido adotadas, apresentando elevada eficiência, como a flotação por ar dissolvido, a filtração em margem e a tecnologia de filtração em membranas.

A adoção de etapas de pré e pós-oxidação têm demonstrado resultados satisfatórios quanto à remoção de cianobactérias, mas apresentam problemas pela facilidade em promover a lise celular desses organismos, permitindo a liberação das cianotoxinas para o meio. Sens et al. (2005), em estudos utilizando a ozonização, destacam que a aplicação deste processo antes da remoção das células de cianobactérias potencialmente tóxicas deve ser analisada com precaução, uma vez que poderá promover a lise celular dos organismos. Por outro lado, a ozonização realizada ao término do tratamento, pode apresentar elevada eficiência de remoção de cianotoxinas, podendo resultar na completa destruição desses compostos. Além da liberação de toxinas, deve-se considerar a potencialidade de formação de subprodutos da oxidação quando da presença de matéria orgânica e de material extracelular das cianobactérias.

A adsorção em carvão ativado na remoção de cianotoxinas presentes na água apresenta resultados satisfatórios. No entanto, um dos problemas relacionados com a sua adoção deve-se a possibilidade deste material sofrer redução na capacidade adsorviva em função da matéria orgânica presente no meio (Lee; Walker, 2006).

Em relação aos sistemas de filtração em areia, lenta ou direta, embora diversos estudos na literatura indiquem sua elevada eficiência quanto a remoção de cianobactérias e mesmo de cianotoxinas, altas densidades de algas e cianobactérias na água bruta podem resultar em uma rápida colmatação dos filtros, repercutindo em maiores paradas para limpeza ou remoção da camada biológica superficial. Neste contexto, a adoção de sistemas de pré-tratamento

torna-se necessária, com o intuito de impedir a sobrecarga do sistema de filtração.

A flotação por ar dissolvido (FAD) tem sido considerada um processo de tratamento efetivo, particularmente para águas que apresentam baixa turbidez e cor elevada, condições que caracterizam águas de ambientes eutrofizados. Uma vantagem considerada para a FAD em relação à sedimentação deve-se a menor permanência do lodo no sistema, evitando o rompimento das células de cianobactérias, impedindo, dessa forma, a liberação das toxinas. Por permitir a remoção de um maior número de células intactas e dessa forma, elevadas remoção de toxinas intracelulares, a FAD permite ainda, maiores carreiras de filtração na etapa subsequente, resultando em menores custos de processo e melhor qualidade da água tratada. Diversos estudos na literatura reportam a eficiência da FAD na remoção de algas e cianobactérias em águas de abastecimento (Centurione Filho; Di Bernardo, 2003; Oliveira, 2005; Assis, 2006; Teixeira; Rosa, 2006). Considerando a remoção de toxinas dissolvidas, entretanto, estudos indicam a baixa eficiência do processo para esta finalidade (Assis, 2006; Teixeira e Rosa, 2006; Coral, 2009), assim como observado para a sedimentação.

A filtração em margem tem se mostrado uma alternativa de tratamento bastante viável, simples e econômica, utilizada com a finalidade de remover materiais em suspensão, microrganismos e diferentes contaminantes químicos utilizando o próprio solo adjacente à fonte de água como meio filtrante. Neste tipo de sistema, são construídos poços nas margens da captação, de forma a criar uma diferença de nível que permita o escoamento da água no sentido proposto, passando pelo sedimento e sendo, dessa forma, tratada. As pesquisas realizadas no Brasil, visando à adoção desse sistema em mananciais de abastecimento com presença de cianobactérias, de forma a reduzir o impacto sobre o sistema de tratamento, apresentam resultados bastante satisfatórios (Sens et al., 2006).

A reduzida eficiência dos sistemas convencionalmente utilizados para o tratamento de água quanto a remoção de toxinas, induz a busca por novas tecnologias. Na literatura destacam-se os processos de separação com membranas como uma tecnologia promissora na obtenção de elevadas eficiências de remoção, tanto de cianobactérias como de cianotoxinas (Hitzfeld et al., 2000). Dentre os diferentes processos de separação por membranas, classificados em função do tipo de membrana utilizada e demais

princípios de separação, a microfiltração (MF) e a ultrafiltração (UF), tem sido estudadas com o objetivo de remoção células de cianobactérias. Estudos realizados no âmbito do Prosab 4, utilizando membrana de ultrafiltração, indicaram a remoção de diferentes espécies de algas e cianobactérias em águas de abastecimento em sua totalidade (Mierzwa, 2006). A nanofiltração, por sua vez, tem sido estudada como um processo promissor na remoção de cianotoxinas, por apresentar reduzido diâmetro de poros, sendo capazes de reter compostos moleculares entre 200 e 1.000 Da (Baker, 2004), faixa em que diferentes cianotoxinas podem ser removidas.

Na Tabela 1, encontram-se relacionados estudos visando a remoção de cianobactérias e cianotoxinas a partir dos processos de tratamento mencionados anteriormente.

Tabela 1 - Diferentes tratamentos aplicados para a remoção de cianobactérias e cianotoxinas.

Processo	Constituinte	Remoção/degradação	Autor/ano
Processos oxidativos			
UV/H ₂ O ₂ ⁽¹⁾	MCYST ⁽²⁾	94,83%	Qiao et al. (2005)
Ozônio (O ₃)	<i>Microcystis aeruginosa</i>	75,3%	Miao e Tao (2009)
	MCYST-RR	89,3%	
	MCYST-LR	95,7	
Pré-oxidação	Fitoplâncton		Mondardo et al. (2006)
Cloro (Cl)		68,0%	
Ozônio (O ₃)		99,2%	
O ₃ /H ₂ O ₂	MCYST-RR	> 95,0%	Al Momani (2008)
	MCYST-LR	65,0 a 95,0%	
O ₃ /Fe(II)	MCYST-RR	> 99,0%	
	MCYST-LR	> 99,0%	
Adsorção em Carvão ativado			
Carvão ativado granular (CAG)	Neurotoxinas	95,0%	Falconer et al. (1989)
	Hepatotoxinas	> 95,0%	
Carvão ativado em pó (CAP)	MCYST-RR	~ 100,0%	Cook; Newcombe (2002)
	MCYST-YR	~ 80,0%	
	MCYST-LR	~ 70,0%	
	MCYST-LA	~ 30,0%	
Filtração			
Filtração em margem	Fitoplâncton	98,9%	Rabelo (2006)
	Cianobactérias	99,2%	
Filtração em margem	Fitoplâncton	90,0% a 98,0%	Mondardo et al. (2008)
Flotação por ar dissolvido (FAD)			
FAD	<i>C. raciborskii</i>	93,0%	Oliveira (2005)
FAD	<i>M. aeruginosa</i>	92,0%	Assis (2006)
	MCYST	30,0%	
FAD	<i>M. aeruginosa</i>	93,0% a 98,0%	Teixeira e Rosa (2006)
FAD	<i>C. raciborskii</i> , <i>L. planctonica</i> e <i>Planktolyngbya sp.</i>	97,5%	Coral (2009)
	neoSTX, dcSTX e STX		
		7,22 a 22,55%	
Processos de separação com membranas			
Ultrafiltração (UF)	Algas e cianobactérias	~ 100,0%	Mierzwa (2006)
Ultrafiltração (UF)	MCYST - intracelular	> 98%	Gijssbertsen-Abrahamse et al. (2006)
Nanofiltração (NF)	MCYST - extracelular	100,0%	
	Anatoxina-a	96,0% a 98,0%	
Nanofiltração (NF)	MCYST e anatoxina-a	~ 100,0%	Teixeira; Rosa (2006b)
Nanofiltração (NF)	neoSTX, dcSTX, e STX	39,98% a 100% (NF270); 100% (NF90)	Coral (2009)

(1) UV – Luz Ultravioleta; H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio

(2) MCYST - Microcistina

Estudos relacionados à remoção de cianotoxinas por membranas de nanofiltração para diferentes tipos de cianotoxinas têm demonstrado a eficiência da aplicação desta tecnologia para tal finalidade (Teixeira; Rosa, 2005; Teixeira; Rosa, 2006b; Teixeira; Rosa, 2006c; Gijsbertsen-Abrahamse et al., 2006; Coral, 2009).

No Brasil, estudos em pequena escala têm sido desenvolvidos visando a avaliação de processos de tratamento para remoção de cianobactérias e cianotoxinas, como a flotação por ar dissolvido, filtração em margem, filtração lenta e direta, oxidação e filtração em membranas, entre outros. Grande parte destes estudos é vinculada ao Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB) em parceria com diversas instituições de ensino no país. Alguns resultados destes estudos podem ser encontrados na edição 4 do livro PROSAB – Águas. Em maior escala, o Governo do Rio Grande do Norte, por meio da Caern (Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte) iniciou, no ano de 2009, a implantação de uma estação piloto de tratamento de água (ETA) no município de Acari, próximo ao açude Gargalheiras. Com investimento de R\$150 mil, pretende-se a reprodução de diversos tipos de tratamento que produzirão parâmetros de projetos para adequar às Estações de Tratamento de Água do Estado, principalmente em relação a mananciais eutrofizados (IN, 2009). Dentre os processos avaliados, tem-se a realização do estudo dos processos de oxidação e adsorção como coadjuvantes da dupla filtração.

CONCLUSÕES

A presença de algas e cianobactérias em mananciais de abastecimento é uma realidade presentes em muitos locais, inclusive no Brasil. O conhecimento aprofundado das características destes organismos, assim como o entendimento da necessidade de controle a essa proliferação, são fatores que devem ser considerados. Pesquisas de processos de tratamento que permitam a remoção de cianobactérias e das toxinas por estas produzidas são de elevada importância para reduzir as possibilidades de novos problemas de intoxicação humana. Não esgotam as possibilidades para resolver a problemática da presença de cianobactérias em mananciais de abastecimentos. Os estudos devem ser aprofundados em busca do aperfeiçoamento dos processos e de novas alternativas visando reduzir os riscos à saúde e a garantia de distribuição de água com qualidade aos consumidores.

REFERÊNCIAS

AL MOMANI, F.; SMITH, D. W.; EL-DIN, M. G. Degradation of cyanobacteria toxin by advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 150, 2008. p. 238-249.

ASSIS, R. S. S. Remoção de *Microcystis aeruginosa* e microcistinas por flotação por ar dissolvido – estudo em escala de bancada utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulantes. Brasília: UNB. Dissertação Mestrado, 2006.

BAKER, R. W. *Membrane Technology and applications*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd, England, 2004. 545 p.

BRANDÃO, L. H.; DOMINGOS, P. Fatores ambientais para a floração de cianobactérias tóxicas. *Saúde & Ambiente em Revista*, Vol. 1, Nº 2, 2006. p. 40-50.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação nacional de Saúde. *Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em água consumo humano*. Brasília, 2003. 56p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Coordenação-Geral da Vigilância em Saúde Ambiental*. Portaria N 518, 2004. 34 p.

CARMICHAEL, W. W.; AZEVEDO, S. M. F. O.; AN, J. S.; MOLICA, R. J. R.; JOCHIMSEN, E. M.; LAU, S.; RINEHART, K. L.; SHAW, G. R.; EAGLESHAM, G. K. Human fatalities from cyanobacteria: chemical and biological evidence for cyanotoxins. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 109, Nº 7, 2001. p. 663-668.

CARMICHAEL, W. A world overview – one-hundred-twenty-seven years of research on toxic cyanobacteria – Where do we go from here? In: Hudnell, H. K. *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: state of the science and research needs*. Springer Science & Business Media, LLC, New York, 2008.

CENTURIONE FILHO, P. L.; DI BERNARDO, L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol. 8, Nº 1, 2003. p. 39-44.

CHAVES, P. F.; LA ROCHA, S. B.; DUTRA, T. M.; YUNES, J. S. Ocorrência de cianobactérias produtoras de toxinas no Rio dos Sinos (RS) entre os anos de 2005 e 2008. *Oecol. Bras.*, Vol. 13, Nº 2, 2009. p. 319-328.

COOK, D.; NEWCOMBE, G. Removal of microcystin variants with powdered activated carbon. *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 2, Nº 5-6, 2002. p.201-207.

CORAL, L. A. Remoção de cianobactérias e cianotoxinas em águas de abastecimento pela associação de flotação por ar dissolvido e nanofiltração. Florianópolis: UFSC. Dissertação Mestrado, 2009.

CRUZ, L. S.; SOUZA, W. G.; KELLER, R.; CASSINI, S. T. A.; GONÇALVES, R. F. Variação temporal quali-quantitativa das

comunidades fitoplanctônicas em uma lagoa de polimento de efluente anaeróbico. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, 2005.

FALCONER, I. R.; RUNNEGAR, M. T. C.; BUCKLEY, T.; HUYN, V. L.; BRADSHAW, P. Using activated carbon toxicity from drinking water containing cyanobacterial blooms. *Journal American Water Works Association*, Vol. 81, Nº 2, 1989. p. 102-105.

FRANÇA. Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA). Agence Française de Sécurité Sanitaire de L'environnement et du travail (AFSSET). Risques sanitaires liés à la présence de cyanobactéries dans l'eau. 2006. 232 p.

FURTADO, A. L. F. F.; CALIJURI, M. C.; LORENZI, A. S.; HONDA, R. Y.; GENUÁRIO, D. B.; FIORE, M. F. Morphological and molecular characterization of cyanobacteria from a Brazilian facultative wastewater stabilization pond and evaluation of microcystin production. *Hydrobiologia*, Vol. 327, 2009. p. 195-209.

GIJSBERTSEN-ABRAHAMSE, A. J.; SCHMIDT, W.; CHORUS, I.; HEIJMAN, S. G. J. Removal of cyanotoxins by ultrafiltration and nanofiltration, *Journal of Membrane Science*, Vol. 276, 2006. P. 252-259.

GODOY, O. A. Avaliação da presença de cianobactérias em efluentes de sistema de tratamento de esgotos sanitários por lagoas de estabilização associadas a tratamento físico-químico. São Paulo: Escola Politécnica de Engenharia. Dissertação Mestrado, 2007.

HITZFELD, B. C.; HOGER, S. J.; DIETRICH, D. R. Cyanobacterial toxin: removal during drinking water treatment, and human risk assessment. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108 (Suppl. I), 2000. p. 113-122.

IN. Invest NE. CAERN implanta estação de tratamento de água em mananciais (RN). Disponível em: < <http://www.investne.com.br/Noticias-Rio-Grande-do-Norte/CAERN-implanta-Estacao-de-Tratamento-de-Agua-em-Mananciais-RN> >. Acesso 05 mai. 2010.

LEE, J., WALKER, H.W. Effect of process variables and natural organic matter on removal of microcystin-LR by PAC-UF. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 4, 2006. p. 7336-7342.

LORENZI, A. S. Abordagens moleculares para detectar cianobactérias e seus genótipos produtores de microcistinas presentes nas represas Billings e Guarapiranga, São Paulo,

Brasil. Piracicaba: USP. Dissertação Mestrado, 2004.

MAIZONAVE, C. R. M. Florações de algas e cianobactérias no lago Guaíba: série histórica do Dmae de Porto Alegre, RS. *ECQS - Revista Quadrimestral de Saneamento Ambiental*, Vol. 29, ano 16, 2009. p. 6-12.

MARTINS, R. et al. Toxicity of culturable cyanobacteria strains isolated from the Portuguese coast. *Toxicon*, Vol. 46, 2005. p.454-464.

MELO, A. E. S. Avaliação da filtração lenta na remoção de células de *Cylindrospermopsis raciborskii* e saxitoxinas. Brasília: UNB. Dissertação Mestrado, 2006.

MELO FILHO, L. C. Avaliação da ozonização como pré ou pós-tratamento à filtração direta descendente na remoção de cianobactérias e saxitoxinas. Florianópolis: UFSC. Tese Doutorado, 2006. 283p.

MIAO, H.; TAO, W. The mechanisms of ozonation on cyanobacteria and its toxins removal. *Separation and Purification Technology*, v. 66 (2009) 187-193.

MIERZWA, J. C. Processos de separação por membranas para tratamento de água. . In: Prosab 4 – Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano. Belo Horizonte: ABES, 2006. p. 335-380.

MOLICA, R., ONODERA, H., GARCÍA, C., RIVAS, M., ANDRINOLO, D., NASCIMENTO, S., MEGURO, H., OSHIMA, Y., AZEVEDO, S., LAGOS, N. Toxins in the freshwater cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanophyceae) isolated from Tabocas reservoir in Caruaru, Brazil, including demonstration of a new saxitoxin analogue. *Phycology*, Vol. 41, Nº 6, 2002. p. 606-611.

MONDARDO, R. I. Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias. Florianópolis: UFSC. Dissertação Mestrado, 2004.

MONDARDO, R. I; SENS, M. L.; MELO FILHO, L. C. Pré-tratamento com cloro e ozônio para remoção de cianobactérias. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol. 11, Nº 4, 2006. p. 337-342.

MONDARDO, R. I.; SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.; SILVA, R. L.; PROENÇA, L. A. O. Filtração em margem: alternativa como um pré-tratamento à filtração direta na remoção de

cianobactérias e saxitoxinas. In: 23º Congresso Interamericano AIDIS, Santiago, Chile, 2008.

NASCIMENTO, S. M. Algas azuis. Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco – ITEP. 1999, 28 p.

OLIVEIRA, J. M. B. Remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* por meio de sedimentação e flotação: avaliação em escala de bancada. Brasília: UNB. Dissertação Mestrado, 2005.

PAERL, H.; HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, Vol. 1, Nº 1, 2009. p. 27-37.

PROSAB 4. Manual para estudo de cianobactérias planctônicas em mananciais de abastecimento público: caso da represa Lomba de Sabão e lago Guaíba, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 64 p.

QIAO, Rui-Ping; Li, N.; QI, Xin-Hua; WANG, Qi-Shan; ZHUANG, Yuan-Yi. Degradation of microcystin-RR by UV radiation in the presence of hydrogen peroxide. *Toxicon*, Vol. 45, 2005. p. 745-752.

RABELO, L. Estudos preliminares para implantação da filtração em margem na lagoa do peri como pré-tratamento de água para remoção de fitoplâncton. Florianópolis: UFSC. Dissertação Mestrado, 2006. 152p.

ROBERT, C.; TREMBLAY, H.; DeBLOIS, C. Cyanobactéries et cyanotoxines au Québec : suivi à six stations de production d'eau potable (2001-2003). *Direction Générale des Politiques*, 2005. 73 p.

SÁ, J. C. Remoção de *Microcystis aeruginosa* e microcistina pelo processo de filtração lenta. Brasília: UNB. Dissertação Mestrado, 2002.

SANT'ANNA, C.; AZEVEDO, M. T. Contribution to knowledge of potentially toxic cyanobacteria from Brazil. *Nova Hedwigia*, Vol. 71, Nº 3-4, 2000. p. 359-385.

SANT'ANNA, C. L.; AZEVEDO, M. T. P.; WERNER, V. R.; DOGO, C. R.; RIOS, F. R.; CARVALHO, L. R. Review of toxic species of cyanobacteria in Brazil. *Algological Studies*, Vol. 126, 2008. p. 251-265.

SENS, M. L.; MELO FILHO, L. C.; DALSASSO, R. L.; PROENÇA, L. A. Efficiency of ozonation as pre or post-treatment to the direct descent filtration for the removal of cyanobacteria and saxitoxins. In: *Conferência Internacional*

Água, Cali, 2005. Universidad del Valle, 2005.

SENS, M. L.; DALSASSO, R. L.; MONDARDO, R. I.; MELO FILHO, L. C. Filtração em Margem. In: *Prosab 4 – Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: ABES, 2006. p. 173-236.

SIVONEN K., JONES, G. Cyanobacterial toxins, in: I. Chorus, J. Bartram (Eds), *Toxic Cyanobacteria in Water*, Spon, London, 1999. p. 41-111.

TEIXEIRA, M. G. L. C.; COSTA, M. C. N.; CARVALHO, V. L. P.; PEREIRA, M. S.; HAGE, E. Epidemia de gastroenterite na área da barragem de Itaparica, Bahia. *Bol. of Sanitary Panamerican*, Vol. 114, Nº 6, 1993. p. 502-512.

TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Microcystins removal by nanofiltration membrane. *Separation and Purification Technology*, v. 46, p. 192-201, 2005.

TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa* Part I: The key operating conditions. *Separation and Purification Technology*, Vol. 52, Nº 1, 2006. p. 84-94.

TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Neurotoxic and hepatotoxic cyanotoxins removal by nanofiltration. *Water Research*, Vol. 40, 2006b. p. 2837-2846.

TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Integration of dissolved gas flotation and nanofiltration for *M. aeruginosa* and associated microcystins removal. *Water Research*, v.40, p. 3612-3620, 2006c.

WHO. Guidelines for safe recreational-water environments: coastal and fresh-waters. Geneva: World Health Organization. 1998. 209 p.

YUNES, J. S. Programa AGUAAN – Agilização do gerenciamento e utilização de águas com algas nocivas. *Biológico*, São Paulo, Vol. 65, Nº 1/2, 2003. p. 117-119.