

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA ULTRAFILTRAÇÃO
EM MEMBRANA NA REMOÇÃO DE CÉLULAS DE
CIANOBACTÉRIAS E MICROCISTINA PARA ÁGUAS
DE ABASTECIMENTO

ÁLISON BRAGANÇA SILVA

Belo Horizonte

2008

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA ULTRAFILTRAÇÃO
EM MEMBRANA NA REMOÇÃO DE CÉLULAS DE
CIANOBACTÉRIAS E MICROCISTINA PARA ÁGUAS
DE ABASTECIMENTO**

ÁLISON BRAGANÇA SILVA

ÁLISON BRAGANÇA SILVA

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA ULTRAFILTRAÇÃO
EM MEMBRANA NA REMOÇÃO DE CÉLULAS DE
CIANOBACTÉRIAS E MICROCISTINA PARA ÁGUAS
DE ABASTECIMENTO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento.

Linha de pesquisa: Qualidade e tratamento de água para consumo humano.

Orientador: Marcelo Libânio.

Co-orientadora: Alessandra Giani.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

À querida amiga Mãe

Rosa.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do programa SMARH pelos ensinamentos que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa experimental e pelo apoio.

Aos órgãos financiadores e àqueles que participaram de algum modo desta dissertação: FINEP, CAPES, CNPq, Thech desinfecção, Centro de Pesquisa Hidráulica (UFMG), Laboratório de Microbiologia (DESA-UFMG), GEPLA (PBH), Laboratório de Ficologia do ICB (UFMG), Laboratório de Físico-Química (DESA-UFMG) e ao Iate Tênis Clube.

A toda rede Prosab água do Edital V.

Aos funcionários do departamento que cuidaram bem do andamento dos assuntos de burocracia institucional.

Aos Professores Mauro Naghettini, Valter de Pádua, Mônica Leão, Raphael Barros e Carlos Martinez, ressaltando o incentivo, a ajuda, o esclarecimento e a amizade.

Aos colegas de disciplinas e especialmente àqueles que conquistaram um espaço aqui no coração.

Aos amigos de BH e demais locais em cujos caminhos, aqui, se encontraram.

À Professora Cássia e ao amigo Delcir por serem sempre um apoio amigo.

Aos amigos do período da graduação na UFMG, agora profissionais de valor.

À Família de Hugo, Eugênia e Hugo José que me receberam de braços abertos.

À professora Alessandra e sua aluna de PhD Ana Helena, poços de simplicidade e sabedoria.

Ao Professor Marcelo Libânio, meu orientador, que aceitou este desafio com dedicação e seriedade, tornando-se um grande amigo. Agradeço-lhe muitíssimo e deixo-lhe esta célebre frase:

“A mente que se abre a uma nova idéia, jamais voltará ao seu tamanho original.” (Albert Einstein).

Aos mestres e amigos de infância que fazem parte desta história.

À minha terra natal: Luz – MG.

À minha família.

A Deus nosso escudo e nossa fortaleza.

RESUMO

O principal objetivo desta pesquisa foi verificar a remoção de células de cianobactérias e cianotoxinas por meio de ultrafiltração (UF) em membranas em escala piloto. A pesquisa foi realizada utilizando água bruta captada às margens da Lagoa da Pampulha em Belo Horizonte, Minas Gerais. O equipamento de ultrafiltração foi operado no período de abril a agosto de 2008, totalizando 80 horas de monitoramento.

As florações de cianobactérias têm sido grande empecilho na operação adequada das estações de tratamento de água em várias localidades ao redor do globo. Além de colmatarem os meios filtrantes e reduzirem as carreiras de filtração, parcela significativa das espécies de cianobactérias pode apresentar toxicidade.

Aliada à remoção de cianobactérias, o estudo também contemplou o monitoramento de parâmetros físico-químicos e biológicos e de funcionamento da unidade-piloto: pH, temperatura, alcalinidade, dureza, cor verdadeira, cor aparente, coliformes totais e *Escherichia coli*, pressão do sistema, vazão de permeado e concentrado. Complementando a pesquisa, foram realizadas análises de microcistina por meio do teste imunocompetitivo (ELISA).

A membrana de UF não removeu dureza e alcalinidade, pois, a faixa de rejeição da membrana UF não abrange íons bivalentes como de Ca e Mg. Por meio de análises feitas com o Kit Colilert foi possível concluir que o sistema de ultrafiltração removeu completamente *Escherichia coli*. A eficiência média de remoção de cor aparente superou 90% na unidade-piloto (93 uH no afluente para 5 uH no permeado). Enquanto a eficiência média de remoção de cor verdadeira foi de aproximadamente 50% (sendo encontrado o valor médio de 8 uH no ponto de captação), pois a membrana de UF rejeita parcialmente as substâncias orgânicas dissolvidas na água bruta.

Concluiu-se que a tecnologia de separação por membrana de ultrafiltração pode remover eficientemente células de cianobactérias e algas. Acrescenta-se que, a tecnologia de UF pôde remover também a concentração de microcistina presente na água bruta. A microcistina, que é uma endotoxina, foi removida, pois não houve lise celular. Enfim, a tecnologia de ultrafiltração avaliada produziu água potável nos padrões de qualidade da portaria brasileira vigente para todos os parâmetros analisados nesta pesquisa.

ABSTRACT

The aim of this research was to verify the cyanobacterial cells removal by means of ultrafiltration membrane technology in a pilot scale. This study took place in Pampulha Lake in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. The pilot plant has operated from April to August 2008. The operation of UF membrane pilot plant was monitored during 80 hours.

Cyanobacterial blooms have become common at many water treatment plants around the world. Many problems in water treatment plants concerning cyanobacteria can be mentioned like: tastes and odors in the water; media filter clogging which increases backwashing frequency, and therefore increasing the operational costs. Finally these blooms may produce toxic compounds that could do harm for consumers.

In this research the following parameters were analyzed such as pH, alkalinity, hardness, turbidity, true color, apparent color and counting of phytoplankton. It were detected Total coliforms and *Escherichia coli* in raw water and the permeate by Colilert Test kit. Cyanobacterial toxin analysis was determined by ELISA method.

The study pointed ultrafiltration membrane out was not able to remove hardness and alkalinity efficiently because this membrane can not reject ions like Ca, Mg. In the other hand, *Escherichia coli* was effectively removed during the test period. About apparent color, the medium UF membrane's removal achieved over 90%. Nevertheless, the UF pilot plant could only remove true color by 35% because the UF membrane can not reject most of dissolved organic matter from raw water.

The UF membrane achieved 5 log removal of *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Sphaerocavum brasiliense* during each cyanobacterial blooms. Besides removing cells, the UF membrane pilot scale could remove microcystin efficiently at 68 F and 20 psi, nevertheless this one couldn't reject alkaloid toxins. Finally, this research concluded that UF membrane is able to remove cells of algae and cyanobacteria efficiently.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	MEMBRANAS FILTRANTES.....	17
3.2	CIANOACTÉRIAS.....	31
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	40
4.2	INSTALAÇÃO, DESCRIÇÃO E MONITORAMENTO DO CONJUNTO-PILOTO	42
4.3	MEMBRANA FILTRANTE	47
4.4	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DA ULTRAFILTRAÇÃO.....	48
4.5	PONTOS DE COLETAS	49
4.6	AMOSTRAGEM E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS	51
4.7	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	52
4.8	PARÂMETROS BIOLÓGICOS	53
4.9	CONTAGEM DE FITOPLÂNCTON	54
4.10	DETECÇÃO DE CIANOTOXINAS	55
4.11	QUANTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	56
4.12	LIMPEZA QUÍMICA DA MEMBRANA DE UF	57
4.13	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	58

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	MONITORAMENTO DO CONJUNTO-PILOTO	59
5.2	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	60
5.3	ANÁLISES DE FITOPLÂNCTON.....	67
5.4	ANÁLISES BACTERIOLÓGICAS	74
5.5	ANÁLISES DE CIANOTOXINAS.....	75
5.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	77
6	CONCLUSÕES	84
7	RECOMENDAÇÕES.....	86
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
9	ANEXO: ANÁLISES DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA.....	93
10	APÊNDICE: ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Avaliação do custo total da tecnologia de membranas MF e UF em função do volume tratado (adaptado de Elarde & Bergman,2001).....	19
Figura 3-2: Avaliação do custo de membrana MF e UF por m ² a partir de 1990 (adaptado de Elarde & Bergman, 2001).....	20
Figura 3-3: Influência dos fluxos operacionais na produção efetiva e nos custos operacionais e de manutenção de um sistema de membrana UF (AWWA, 2003).....	20
Figura 3-4: Esquema básico de funcionamento de uma membrana.	22
Figura 3-5: Classificação das membranas e dimensões das partículas retidas (adaptado de AWWA, 1998).....	24
Figura 3-6: Membrana de UF: (a) em módulo espiral; (b) corte de um elemento de membranas (RIDWAY et al., 1983).	25
Figura 3-7: Principais componentes do custo total de um sistema de membrana MF ou UF durante todo o seu ciclo de vida (Adaptado de CÔTÉ <i>et al.</i> , 2001).	26
Figura 3-8: ETA de sistema integrado na cidade de Auckland na Nova Zelândia.....	30
Figura 3-9: Desenho esquemático da estrutura de uma cianobactéria.	32
Figura 4-1: Localização do experimento na orla da Lagoa da Pampulha (fonte: Google Earth, 2008).....	40
Figura 4-2: Iate Tênis Clube às margens da Lagoa Pampulha (fonte: METZ, 2008. Google Earth).	41
Figura 4-3: Floração de cianobactérias na Lagoa da Pampulha (fonte: BARBOSA, E., 2006).	42
Figura 4-4: Unidade-piloto de ultrafiltração na Pampulha.....	42
Figura 4-5: Pré-filtro de areia e caixa de alimentação do sistema de UF.	44
Figura 4-6: Vistas do conjunto-piloto de filtração em membranas da UFMG.....	45
Figura 4-7: Conjunto moto-bomba, rotâmetros, temporizador e manômetro.	45
Figura 4-8: Válvula solenóide programada para o flush do sistema.....	46
Figura 4-9: Vista frontal da membrana de UF PW 4040 F.	47
Figura 4-10: foto-Fluxograma da unidade piloto de UF.	50
Figura 4-11: Fluxograma do processo da unidade-piloto de ultrafiltração em membrana.	51
Figura 4-12: a) Especfotômetro, b) turbidímetro, c) material de Titulação.	53
Figura 4-13: Cartela do Kit Colilert para análise de Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	54
Figura 5-1: Processo de ultrafiltração: água bruta, concentrado e permeado.	61
Figura 5-2: Monitoramento do parâmetro Dureza Total no ponto de captação e no efluente filtrado.	62
Figura 5-3: Monitoramento do parâmetro Alcalinidade na água bruta e no permeado.	62
Figura 5-4: Monitoramento da turbidez no ponto de captação (I).....	63
Figura 5-5: Monitoramento do parâmetro turbidez no permeado.	64
Figura 5-6: Monitoramento do parâmetro cor verdadeira ao longo do tratamento 65	65
Figura 5-7: Monitoramento de cor aparente nos principais pontos da unidade-piloto.	65
Figura 5-8: Cor verdadeira monitorada no permeado.....	67
Figura 5-9: Microfotografia de espécies de microalgas e cianobactérias comuns na Lagoa da Pampulha (2008).	68
Figura 5-10: Série temporal dos principais gêneros de cianobactérias na água bruta.	69
Figura 5-11: Série temporal do parâmetro Temperatura (°C) na Lagoa da Pampulha.	70
Figura 5-12: Contagem de cianobactérias no ponto de captação da água bruta.....	76
Figura 5-13: Gráfico Box-wisker para o parâmetro Turbidez na Lagoa da Pampulha.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Caracterização da membrana de Ultrafiltração fabricada em polietersulfona.	48
Tabela 4-2: Parâmetros físico-químicos com respectivos métodos analíticos e unidades de medidas	52
Tabela 4-3: Quantificação das análises realizadas.....	56
Tabela 5-1: Monitoramento do conjunto-piloto de ultrafiltração.	59
Tabela 5-2: Resultados de eficiência de remoção do parâmetro cor aparente no sistema de ..	66
Tabela 5-3: Resultados da primeira análise quantitativa do fitoplâncton no ponto I realizada em 15/5/2008.	69
Tabela 5-4: Resultados da primeira análise quantitativa do fitoplâncton após a pré-filtração (ponto II) realizada em 15/5/2008.....	71
Tabela 5-5: Resultado da análise de Fitoplâncton quantitativo no concentrado (ponto IV) realizada em 15/5/2008.....	72
Tabela 5-6: Resultado da análise de Fitoplâncton quantitativo no <i>flush</i> (ponto V) realizada em 15 de maio de 2008.	73
Tabela 5-7: Resultados da análise de Fitoplâncton quantitativo no permeado (ponto III) realizada em 15 de maio de 2008.....	73
Tabela 5-8: Análises de coliformes totais no período de junho a agosto.....	74
Tabela 5-9: Análise de microcistina (μgL^{-1}) no ponto de captação e no concentrado.....	75
Tabela 5-10: Análises qualitativas de saxitoxinas produzidas por <i>C. raciborskii</i>	77
Tabela 5-11: Análise descritiva dos parâmetros turbidez, alcalinidade e dureza referentes ao ponto de captação e ao permeado.....	77
Tabela 5-12: Estatística descritiva para os parâmetros cor Aparente e cor Verdadeira.....	79
Tabela 5-13: Estatística descritiva para as principais espécies de cianobactérias na Lagoa da Pampulha.	79
Tabela 5-14: Eficiência de remoção de células de <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> após a pré-filtração.....	80
Tabela 5-15: Eficiência de remoção de células de <i>C. raciborskii</i> pela membrana de UF	81
Tabela 5-16: Eficiência de remoção da espécie <i>Sphaerocavum brasiliense</i> após pré-filtração.	82
Tabela 5-17: Quadro-resumo de eficiência de remoção da espécie <i>C. raciborskii</i> no conjunto-piloto de ultrafiltração	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COPASA: Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

C. raciborskii: *Cylindrospermopsis raciborskii*.

DESA: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

ELISA: *Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay*.

EPA: *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos EUA).

ETA: Estação de Tratamento de Água.

FAD: Flotação por Ar Dissolvido.

Finep: Financiadora de Estudos e Projetos.

HPLC: *High Performance Liquid Chromatography*.

ITC: Iate Tênis Clube.

MF: Microfiltração.

NF: Nanofiltração.

OMS: Organização Mundial da Saúde.

OR: Osmose Reversa.

PFA: ponto após pré-filtração no filtro de areia.

PMC: Peso Molecular de Corte.

Prosab: Programa de Pesquisas em Saneamento Básico.

psi: *Pound Square Inch*.

QC: Vazão do concentrado.

QP: Vazão do permeado.

S. brasiliense: *Sphaerocavum brasiliense*.

SXT: Saxitoxinas.

THM: Trialometanos.

UF: Ultrafiltração.

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais.

uH: Unidade Hazen (mg Pt-Co/ L).

uT: Unidade de turbidez.

“Where there’s a will, there’s a way.”(Thomas Paine, sec. XVIII).

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, em decorrência do elevado nível de urbanização, muitas áreas próximas aos mananciais estão sendo ocupadas, colocando em risco a qualidade da água dos mananciais. Além disso, o crescente avanço tecnológico, principalmente das indústrias químicas e farmacêuticas, tem disponibilizado no mercado uma enorme quantidade de compostos que trouxeram conforto e benefícios. No entanto, como contrapartida, os efluentes industriais e domésticos acarretam poluição nos corpos d’água com efeitos nocivos à saúde ambiental e humana, em geral, ainda desconhecidos. Adicionalmente, o carreamento de agrotóxicos, nitratos e fosfatos comumente empregados na agricultura concorre para favorecer a eutrofização dos corpos d’água.

Este panorama faz com que entidades reguladoras dos padrões de qualidade de águas utilizadas para fins potáveis sejam mais rigorosas. Com isso, nem sempre os tratamentos convencionais de água e os biológicos de esgotos conseguem atender as normas vigentes.

Em busca de novas alternativas de tratamento de água, nas últimas décadas, principalmente a partir de 1990, foram lançadas no mercado de saneamento básico membranas de separação de partículas para produção de água potável em grande escala: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF). Para a remoção de material particulado e substâncias dissolvidas utilizam-se amplamente as tecnologias de nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR).

O grande aporte de nutrientes lançados nos mananciais e, provavelmente, as alterações climáticas têm favorecido as florações de cianobactérias em muitas partes do globo. Além de serem produtores de toxinas, estes organismos podem interferir no processo de tratamento de água, deixando o sistema de abastecimento público em alerta.

No contexto de ampliar o conhecimento de novas tecnologias de potabilização, o presente trabalho será direcionado para o estudo, em escala piloto, da tecnologia de membranas de ultrafiltração, avaliando principalmente a remoção de células de cianobactérias e de cianotoxinas.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Avaliar, em escala piloto, a remoção de células de cianobactérias e cianotoxinas (microcistina e saxitoxina) por meio de ultrafiltração em membrana.

2.2 *Objetivos específicos*

Avaliar o desempenho operacional da membrana de ultrafiltração no tratamento de água para abastecimento.

Avaliar o desempenho do sistema de ultrafiltração em membrana na remoção dos seguintes parâmetros físico-químicos e biológicos: alcalinidade, dureza total, cor verdadeira, cor aparente, turbidez, coliformes totais e *Escherichia coli*.

Realizar análises de cianotoxinas no permeado para avaliação do desempenho da membrana de UF na remoção de microcistina e saxitoxina.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Membranas Filtrantes*

Em 1927, na Alemanha, foi comercializado o primeiro modelo de membrana para remoção de macromoléculas e micro-organismos por meio de difusão, porém com baixo fluxo de produção. A tecnologia de separação por membranas tornou-se comercialmente viável devido aos avanços de uma pesquisa realizada por Sourirajan e Loeb na Universidade da Califórnia, Los Angeles em 1960. O objetivo principal daquela pesquisa era o desenvolvimento de membranas sintéticas para a dessalinização de águas marinhas. Esta pesquisa trouxe um amplo desenvolvimento na produção de membranas assimétricas, que foram comercializadas para as indústrias química, farmacêutica e de alimentos (CHERYAN, 1986).

Em meados da década de 1970, a tecnologia de membranas de osmose reversa (OR) para a potabilização de águas do mar já podia ser realizada em escala industrial (TANIGUCHI, 1997).

Na década de 1980, uma variante desta tecnologia, a nanofiltração (NF), começou a ser instalada em escala comercial para a remoção de dureza de águas subterrâneas no estado da Califórnia nos EUA. Esta tecnologia também foi utilizada para remoção de cor em águas derivadas de zonas de turfa na Noruega (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001).

O grande avanço do emprego da tecnologia de membranas em saneamento básico ocorreu no início dos anos 1990, quando foram lançadas, nos EUA, membranas de separação de partículas por microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF), derivadas de membranas usadas na hemodiálise, para a produção de água potável em escala industrial.

O uso de membranas para o tratamento de água potável se expandiu rapidamente na América do Norte, devido à crescente preocupação com subprodutos da desinfecção e com microrganismos específicos, além do aumento do número de parâmetros e restrições das normas sobre a qualidade da água para abastecimento (JACANGELO, TRUSSEL e WATSON, 1997).

Atualmente as membranas filtrantes constituem a principal inovação tecnológica nos processos de tratamento de água e esgoto, sendo a primeira grande inovação, desde o desenvolvimento das tecnologias convencionais de tratamento (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001).

Os principais fatores que impulsionam a adoção da tecnologia de membranas pelas empresas de saneamento básico são (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001):

- Os limites para patógenos e contaminantes químicos em águas para consumo humano e em efluentes de estações de tratamento de esgotos estão sendo progressivamente reduzidos pelas autoridades pertinentes. A capacidade da tecnologia convencional para atingir novas metas estabelecidas na legislação de países desenvolvidos está praticamente esgotada. A operação contínua dos sistemas de produção e tratamento de água desses países depende da adoção de tecnologia complementar de alto custo, o que em muitos casos viabiliza a conversão para a tecnologia de membranas;
- O esgotamento dos mananciais de água potável próximos aos grandes centros urbanos está forçando o setor de saneamento básico a reconsiderar a sua filosofia de operação. Um dos

aspectos importantes dessa análise é que grande parte dos usos da água em centros urbanos não requer água com qualidade de consumo humano, mas poderia muito bem ser atendida com água de reúso de qualidades variadas.

- Redução do custo de construção e operação, tornando a tecnologia de membranas competitiva em relação às demais tecnologias de tratamento.

Embora muitas das considerações de custos para um sistema de filtração em membranas sejam similares ao Tratamento Convencional, há algumas diferenças muito importantes. As principais diferenças estão relacionadas ao tipo de membrana e dos componentes do sistema de filtração selecionado, que determinará o custo de construção da planta. Ainda, acrescenta-se que os custos de instalação, operação e manutenção dos equipamentos da unidade de produção projetada são função da capacidade instalada. A partir de uma vazão de 1100 L s^{-1} tratada, tem-se US\$ 0,3 de custo total por m^3 produzido. Estima-se que, em 2015, para plantas com capacidade superior a $0,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, este valor ficará na faixa de US\$ 0,10 a 0,15 (ELARDE & BERGMAN, 2001).

Elarde & Bergman (2001) avaliaram o efeito da escala de produção nos custos de sistemas de microfiltração e ultrafiltração nos EUA desde a expansão desta tecnologia a partir da década de 1990, conforme se mostra nas Figura 3-1 e Figura 3-2.

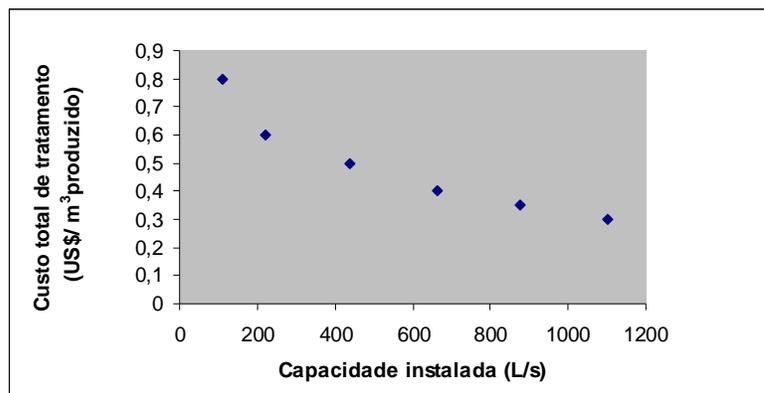


Figura 3-1: Avaliação do custo total da tecnologia de membranas MF e UF em função do volume tratado (adaptado de Elarde & Bergman,2001).

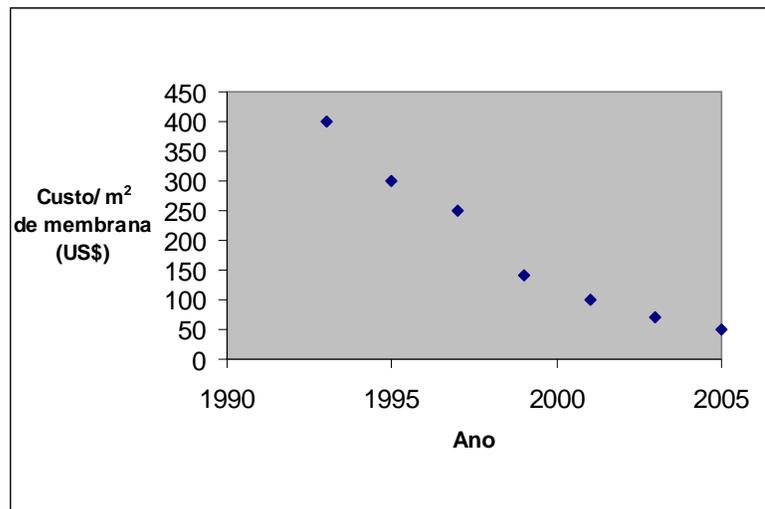


Figura 3-2: Avaliação do custo de membrana MF e UF por m² a partir de 1990 (adaptado de Elarde & Bergman, 2001).

Outro fator a ser considerado nos custos da tecnologia de filtração em membranas é o uso da unidade-piloto, para desenvolver o projeto escolhido para aquela unidade de tratamento, que consome capital e opera em torno de 8 a 14 meses. Finalmente, acrescenta-se que os custos de operação, manutenção e capital são bastante influenciados pelo fluxo operacional do sistema de filtração em membranas projetado. Na Figura 3-3, mostra-se a relação entre capacidade instalada e custos operacionais em função de três fluxos operacionais na mesma estação de tratamento de água para certo sistema instalado, tendo como ano base 2003.

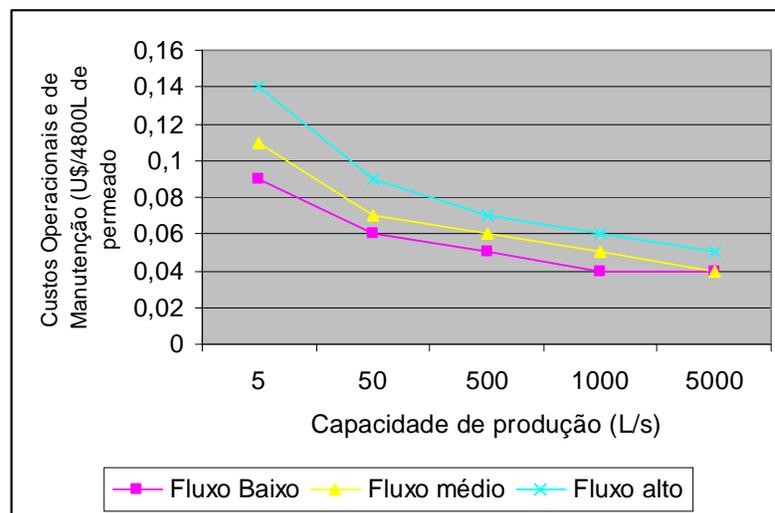


Figura 3-3: Influência dos fluxos operacionais na produção efetiva e nos custos operacionais e de manutenção de um sistema de membrana UF (AWWA, 2003)

Por outro lado, States *et al.* (2000) apresentaram as seguintes desvantagens para aplicação de micro e ultrafiltração para o tratamento de águas:

- A passagem da água pela membrana requer grande diferencial de pressão, necessitando de muita energia elétrica para o funcionamento das bombas hidráulicas;
- A remoção de sais dissolvidos e determinados compostos orgânicos só pode ser realizada por meio de membranas de alta pressão (NF, OR), que oneram o processo;
- As membranas devem ser trocadas a cada cinco ou sete anos, dependendo da qualidade da água a ser tratada e dos parâmetros de operação.

No Brasil, a tecnologia de membranas ainda não está difundida nas estações de tratamento de água. Atualmente, os impostos sobre produtos tecnológicos importados estão elevados, dificultando a aquisição da membrana e a expansão desta tecnologia no país. No entanto, acompanhando as novas regulamentações norte-americanas, européias e da Organização Mundial da Saúde (OMS), o Ministério da Saúde editou a Portaria 518/2004, incluindo recomendações restritas para vários parâmetros. Estas novas restrições, adotadas como normas, levarão à adoção de novas tecnologias no tratamento de água, sendo forte candidata, a separação por membranas filtrantes (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001).

Uma membrana pode ser definida como um filme fino sólido que separa duas soluções e que atua como barreira seletiva para o transporte de componentes destas soluções, quando aplicada algum tipo de força externa. Na Figura 3-4, mostra-se o sistema de separação por membrana, que foi empregado nesta pesquisa.

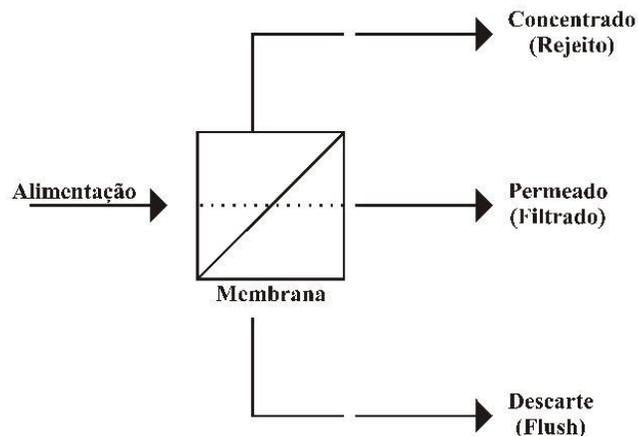


Figura 3-4: Esquema básico de funcionamento de uma membrana.

As forças externas que impulsionam a filtração em membranas utilizadas em saneamento básico são pressão e sucção (pressão negativa). Após a passagem pela membrana, o líquido se transforma em permeado (filtrado). O material, contaminante químico e/ou particulado rejeitado pela membrana, é denominado de concentrado (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001).

É importante ressaltar que membranas são sistemas de separação de materiais, ou seja, não ocorre transformação química ou biológica de componentes durante a filtração. A seletividade de membranas é variada por meio de modificação do tamanho dos poros ou pela alteração das propriedades físico-químicas dos polímeros componentes da membrana, principalmente daqueles localizados na superfície.

A produtividade do sistema depende do fluxo de água através da membrana que, por sua vez, é condicionado por uma série de fatores que, coletivamente, constituem a resistência da membrana à filtração, tais como (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001):

- Porosidade da membrana;
- Diâmetro dos poros;
- Espessura da membrana;

- Pressão de filtração;
- Viscosidade dinâmica da água;
- Camada de material retido na superfície da membrana (tortas de filtro);
- Fenômenos operacionais, por exemplo, a camada de concentração-polarização;
- Géis ou camadas de sais precipitados (denominada de *fouling* químico);
- *Fouling* biológico (biofilmes).

A classificação de membranas mais utilizadas na área de saneamento básico é a seguinte (CHERYAN, 1986):

- membranas de microfiltração (MF) com poros de diâmetro nominal entre 0,1 e 0,2 μm , aptas para remover protozoários, bactérias, algas, cianobactérias e zooplânctons;

- membranas de ultrafiltração (UF), cujas substâncias removidas têm peso molecular entre 1000 e 2000 g mol^{-1} , utilizadas para separação de partículas (entre 0,001 e 0,2 μm) removidas na MF, colóides, compostos orgânicos solúveis e totalidade de vírus;

- membranas de nanofiltração (NF) com peso molecular de corte entre 200 e 1000 g mol^{-1} , para a separação molecular;

- membrana de osmose reversa (OR), com peso molecular de corte menor que 200 g mol^{-1} , usadas para remoção de íons e praticamente toda matéria orgânica.

Esta classificação pode ser bem compreendida por meio da Figura 3-5.

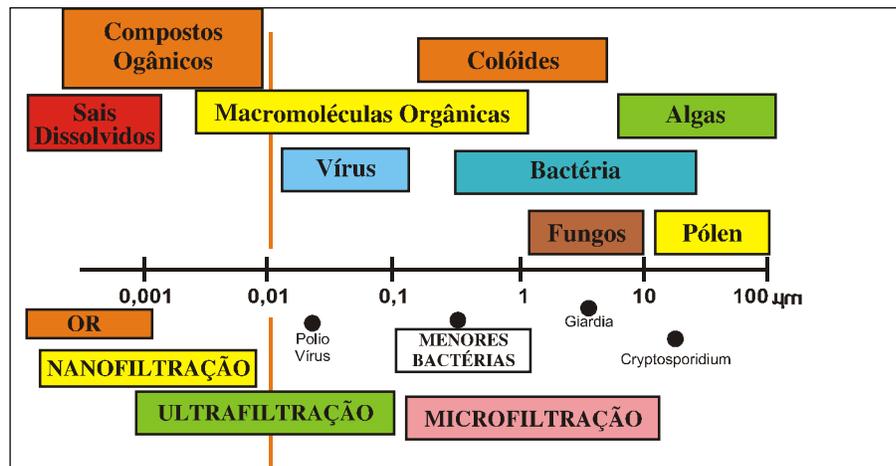


Figura 3-5: Classificação das membranas e dimensões das partículas retidas (adaptado de AWWA, 1998).

Na prática, o mercado de saneamento básico é dominado por membranas fabricadas de polímeros orgânicos, tais como: polisulfona (UF), polipropileno (MF), poliacrilonitrila (UF), poliamida (OR) e polivinilidene-fluorida (UF). O alto custo de fabricação ainda restringe o uso de membranas inorgânicas (cerâmicas de óxido de zircônio, alumínio ou titânio, aço inoxidável).

As membranas podem ser produzidas em larga escala em duas configurações geométricas básicas (SCHNEIDER & TSUTYA, 2001):

- folhas planas, para membranas de nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR);
- cilindros, principalmente para membranas de MF e UF, classificadas em membranas tubulares (diâmetro maior que 3 mm) e membranas de fibra oca (diâmetro menor que 3 mm).

As membranas planas podem ser enroladas em forma de espiral, sendo utilizadas em aplicações que demandam pressões intermediárias (UF) e altas (NF e OR).

O módulo é o elemento básico de um sistema de membrana que congrega todas as estruturas necessárias para viabilizar a operação da membrana como unidade de separação. O módulo contém os seguintes elementos:

- Membranas;

- Estruturas de suporte da pressão, do vácuo ou da corrente elétrica (eletrodialise) aplicada ao conjunto;
- Canais de alimentação e remoção do permeado e do concentrado.

Os principais tipos de módulos no mercado atualmente são: módulos com placa; espirais; tubulares e com fibras ocas.

Na Figura 3-6 a, mostra-se uma membrana constituída de módulos espirais, usada numa indústria têxtil para remoção de ferro no efluente. Cada elemento consiste de um pacote de membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado (Figura 3-6 b).



(a)

(b)

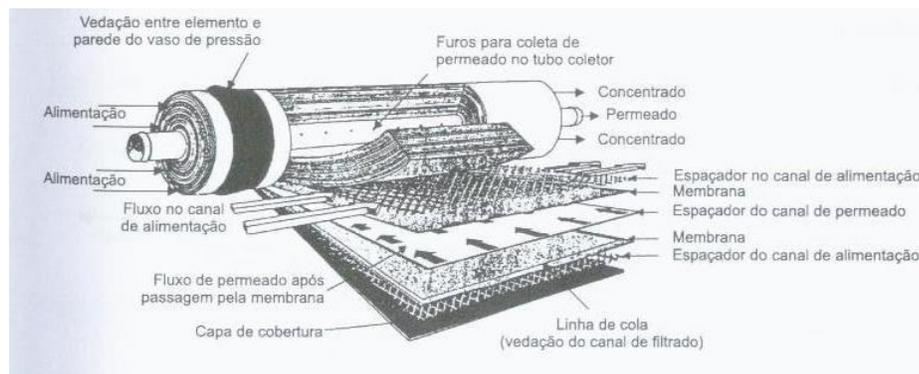


Figura 3-6: Membrana de UF: (a) em módulo espiral; (b) corte de um elemento de membranas (RIDWAY et al., 1983).

Côté *et al.* (2001) indicam que os itens que pesam na composição do custo total de sistema de produção de água potável com membranas de MF e UF são:

- Edificações para proteger as membranas da ação das intempéries;
- Equipamento auxiliar (bombas, sistemas de controle, outros);
- Reposição de membranas;
- Custo de energia elétrica;
- Custo inicial das membranas.

Na Figura 3-7, é mostrada a percentagem dos principais componentes do custo de implantação e operação de um sistema de membrana MF ou UF.

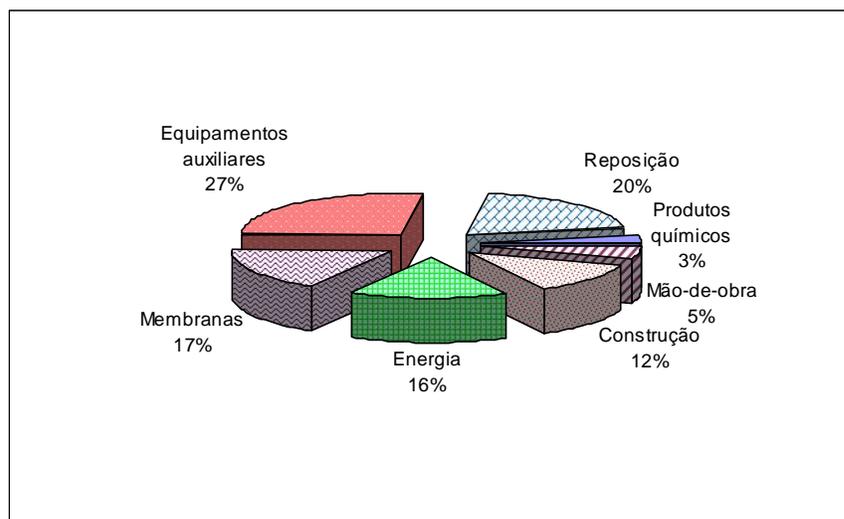


Figura 3-7: Principais componentes do custo total de um sistema de membrana MF ou UF durante todo o seu ciclo de vida (Adaptado de CÔTÉ *et al.*, 2001).

Nota-se que o custo inicial de membranas equivale praticamente ao dispêndio total de energia consumido durante a vida útil do sistema e que o custo de sistemas auxiliares representa o maior elemento individual de custo.

Côte *et al.* (2001) resumiram os critérios mais importantes para a redução do custo de sistemas de membrana MF ou UF para unidades de grande porte:

- Membrana: utilizar fibras ocas de diâmetro mínimo para maximizar a área de filtração por volume unitário de polímero e de módulo; e usar filtração de fora para dentro da fibra oca, para maximizar a área de filtração exposta à água bruta.
- Módulo: maximizar o comprimento das fibras para minimizar o consumo de resina de fixação das fibras; e limitar a perda de carga no interior da fibra a uma fração muito pequena da pressão transmembrana.
- Blocos de membranas: maximizar tamanho para reduzir ao mínimo os pontos de conexão com equipamentos auxiliares; e maximizar a densidade de empacotamento de módulos para reduzir a área ocupada por bloco.
- Operação: operar o sistema sem recirculação da água bruta e sem aeração para reduzir o consumo de energia. Finalmente, limitar a pressão de operação e a frequência de limpeza química para reduzir consumo de energia e de produtos químicos para prolongar ao máximo a vida útil das membranas.

Em busca de aprimoramento dos sistemas de membrana para a produção de água potável em escala industrial, muitas pesquisas associadas a este tema têm sido realizadas.

Nakatsuka, Nakate & Miyano (1996) estudaram o tratamento de água, utilizando um sistema de ultrafiltração com membranas de fibra oca. No estudo, a partir de água de um rio, foi feita a avaliação do desempenho do sistema de UF, utilizando membranas de acetato de celulose e de polietersulfona operando com fluxo tangencial e retrolavagens periódicas. Foi possível concluir que as membranas hidrofílicas, neste caso de acetato de celulose, apresentaram maior fluxo e melhor qualidade da água produzida.

Pianta *et al.* (1998) desenvolveram uma pesquisa sobre a utilização de MF e UF para tratamento de água de abastecimento a partir de águas das nascentes cársticas. Nesta pesquisa, os aspectos relacionados à variação da qualidade da água bruta induziram a utilização de sistemas flexíveis e confiáveis de tratamento para garantir a qualidade da água para abastecimento público. Os estudos foram realizados em escala-piloto por um período de 15 e

12 meses, respectivamente, para a remoção de material particulado e alguns compostos orgânicos específicos (Atrazina, tricloroetano, tetracloroetano). Foi verificado um bom desempenho para baixos valores de turbidez (0,1 – 4,6 uT) na água afluyente à membrana. Para possibilitar a remoção de matéria orgânica natural e outros contaminantes orgânicos, foi feita a dosagem de carvão ativado em pó, obtendo-se resultados satisfatórios, tanto em termos de quantidade da água produzida, como de qualidade.

Outro estudo desenvolvido por Arnal (2004) também teve como objetivo verificar o desempenho de membranas UF para a remoção de microorganismos. Neste estudo, foram avaliadas quatro membranas com diferentes capacidades de retenção de contaminantes, peso molecular de 10000, 30000, 50000 e 100000 g mol⁻¹. Os resultados mostraram que todas as membranas foram eficientes para a retenção de microorganismos.

Chellam & Jacangelo (1998) realizaram um estudo a respeito do depósito (*fouling*) em membranas de baixa pressão. O sistema foi operado com fluxo constante de produção de permeado, e também em condições em que a pressão foi mantida constante. Observou-se que na operação do sistema com fluxo constante, houve uma aceleração do *fouling* ao ser comparado às condições sob pressão constante. Este fato ocorreu devido ao decréscimo da penetração de partículas nos poros da membrana, quando a pressão de alimentação do sistema não foi alterada. Assim, no sistema operado com pressão constante, a taxa de *fouling* é menor, conseqüentemente, o intervalo de limpeza química é mais amplo.

Pittsburgh Water and Sewer Authority (PWSA) opera um sistema de tratamento e distribuição de água que produz em média 2650 L s⁻¹ para abastecer 500 mil pessoas. Neste sistema, um conjunto de membranas (UF) foi integrado como pós-tratamento, para atender às regulamentações da agência americana de proteção ambiental (USEPA). Isto representou um passo adicional no conceito de múltiplas barreiras. (STATES *et al.*, 2000).

O departamento de abastecimento e qualidade da água de Maui, no Havaí, tem operado e monitorado um sistema de ultrafiltração desde 1995. O sistema atende aproximadamente 34 mil conexões. As membranas conseguem remover 6 log de bactérias e produzem permeado com turbidez 0,1 uT (SEITZS & SORGINE, 2007).

Shorney-Darby *et al.* (2007) avaliaram a expansão de sistema de tratamento convencional (1600 L s^{-1}) para 3200 L s^{-1} com membranas de baixa pressão, iniciada em 2005, e realizada em Modesto, na região central da Califórnia. A decisão de expandir um sistema convencional requer um planejamento cuidadoso e a avaliação de alternativas. Para Modesto, um conjunto-piloto foi operado durante quase um ano, além do estudo da disposição dos resíduos da ETA.

Outro exemplo de sistema integrado bem planejado e administrado se encontra em Auckland, na Nova Zelândia, onde há uma ETA que opera com um conjunto de membranas UF integrado ao tratamento convencional (Figura 3-8). O sistema usa membranas de fibras ocas e emprega ar pressurizado para realizar retrolavagem do módulo. Em 2007, para abastecer a região metropolitana desta cidade, cuja população era 1,3 milhões de habitantes, o sistema integrado produziu vazão média da ordem 900 L s^{-1} (LIBÂNIO, 2007).



Figura 3-8: ETA de sistema integrado na cidade de Auckland na Nova Zelândia (fonte: LIBÂNIO, 2007).

No Brasil, o Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) realizou um estudo no contexto do Prosab, iniciado em 2004. Verificou-se que o processo de ultrafiltração possibilita a remoção de matéria orgânica (80,39%), e substâncias que absorvem radiação ultravioleta (66,37%). A pesquisa também destacou a eficiência excelente do conjunto-piloto para remoção de microorganismos como *Escherichia coli*. Durante o período de operação da unidade piloto, não foi possível analisar o

parâmetro cianobactérias, pois não houve ocorrência de florações significativas no reservatório de Guarapiranga (MIERZWA, 2006).

Mierzwa *et al.* (2008) também realizou um estudo econômico para comparar os processos convencional, convencional com unidade de carvão ativado granular e ultrafiltração. Neste estudo comparativo, ficou evidenciado, que o sistema de ultrafiltração apresenta grande potencial para utilização em sistemas de tratamento de água. Ressaltando-se que, embora o sistema convencional apresente menor custo de produção de água (R\$ 0,20 por m³), este apresenta limitações para atender os desafios atuais, exigindo a utilização de técnicas complementares de tratamento. Com isto o custo de tratamento do sistema de ultrafiltração se mostra bastante competitivo quando da utilização de um sistema convencional complementado com carvão ativado, pois se equiparam ao preço de R\$ 0,40 por m³ produzido.

O nordeste é a região brasileira que mais utiliza a tecnologia de membranas atualmente. O sistema de osmose reversa é empregado para a dessalinização de água subterrânea. O permeado é distribuído à comunidade, e o concentrado (solução salobra) é enviado para tanques de criação de peixes (tilápias). O efluente desta piscicultura, enriquecido em matéria orgânica, também, é aproveitado para a irrigação de erva-sal (*Antriplex nummularia*) que, por sua vez, é utilizado na produção de feno para a alimentação e engorda de caprinos e/ou ovinos da região (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2004). No entanto, sabe-se em que algumas comunidades, os sistemas de filtração por membranas OR foram fechados, devido a erros no projeto inicial e à falta mão de obra qualificada na operação da unidade de produção.

3.2 Cianobactérias

As cianobactérias pertenceram a um antigo grupo de organismos existentes no Planeta há 3,5 bilhões de anos. Foram encontradas, no noroeste da Austrália, cianobactérias fossilizadas que, por datação, indicam terem sido elas os primeiros produtores a liberar oxigênio, o que alterou toda a atmosfera terrestre e possibilitou a evolução de muitos outros organismos (YOO *et al.*, 1995).

As cianobactérias são encontradas no mundo todo, seus habitats vão desde fontes termais com pH maior que 5 e temperaturas de 85° C a oceanos gelados da Antártida. Algumas espécies

são encontradas no ambiente terrestre, nos solos sob rochas, e desempenham importante papel nos processos de ciclagem de nutrientes (WHITTON, 1992).

Os ecossistemas de água doce são os ambientes mais apropriados para o desenvolvimento de cianobactérias, pois a maioria das espécies apresenta melhor crescimento em águas neutro-alcalinas com pH de 6 a 9, temperatura entre 15 e 30° C, com alta concentração de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (CALIJURI *et al.*, 2006).

As sinonímias usadas para denominar um mesmo grupo de organismos que apresentam combinação de propriedades encontradas em algas e bactérias são: algas azuis (*blue-green algae*), mixofíceas, cianoprocariontes, cianofíceas e cianobactérias (CASTENHOLZ & WATERBURY, 1989).

As cianobactérias têm a estrutura de uma bactéria como mostrado na Figura 3-9.

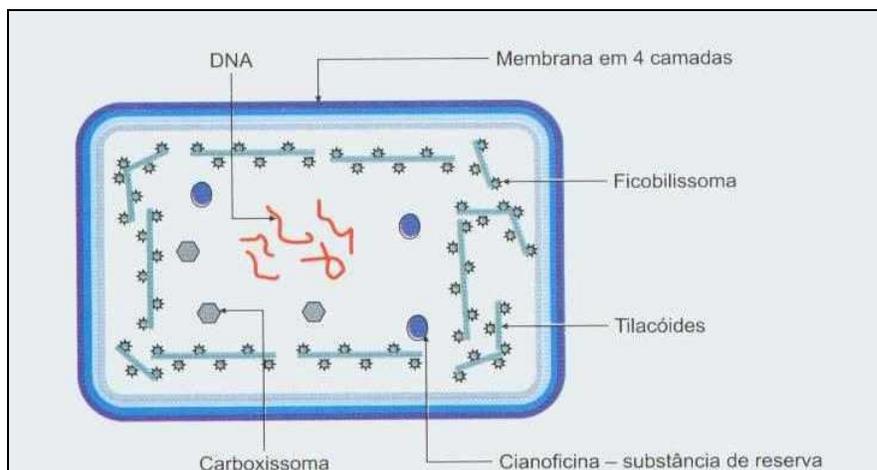


Figura 3-9: Desenho esquemático da estrutura de uma cianobactéria. (CALIJURI *et al.*, 2006).

As cianobactérias exibem parede celular (desprovida de celulose, constituída de polissacarídeos ligados a polipeptídios), membrana plasmática, cápsula ou bainha mucilaginosa, nucleóide, ribossomos, inclusões de fosfato, proteínas e lipídios (não possuem amido, possuem grânulos de cianoficina – composto de reserva que forma grânulos de poliglucanos, semelhantes ao glicogênio), citoplasma e lamelas fotossintéticas (tilacóides), nas quais são encontrados os pigmentos fotossintetizantes (CALIJURI *et al.*, 2006).

As células de cianobactérias não apresentam núcleo delimitado por carioteca. O material nuclear, o ácido desoxirribonucléico (DNA), localiza-se no centro do protoplasma, em região denominada nucleoplasma. Não possuem organelas celulares, como complexo de Golgi, retículo endoplasmático, mitocôndrias e vacúolos, características essas comuns às bactérias, nas quais toda a água está uniformemente associada à matriz orgânica: isso parece explicar a razão pela qual esses organismos se adaptam mais facilmente aos meios com pressão osmótica (BRYANT, 1994).

Algumas cianobactérias, como *Microcystis sp.*, *Gomphosphaeria sp.*, *Anabaena sp.* e *Oscillatoria sp.*, apresentam vacúolos gasosos (pseudovacúolos) associados à capacidade de controlar a flutuação da célula, o que permite que se mantenham em profundidade ótima em nutrientes, concentração de oxigênio e disponibilidade de luz (WALSBY, 1987).

O tamanho das células varia deste o típico tamanho de bactérias, entre 0,5 e 1,0 μm (*Synechocystis sp.*), até células grandes, como *Oscillatoria princeps*, com cerca de 40 μm (TRABULSI et al., 1999).

As cianobactérias mostram considerável diversidade morfológica. Elas podem ser unicelulares, exemplo: *Chroococcus sp.*, *Synechococcus sp.*, ou filamentosas, exemplo: *Anabaena sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Planktothrix sp.*, *Nostoc sp.*, *Cylindrospermopsis sp.*. As cianobactérias podem ocorrer individualmente, como os gêneros *Synechococcus sp.*, e *Aphanothece sp.*, ou agrupadas em colônias, como *Microcystis sp.*, *Gomphosphaeria sp.* e *Merismopedia sp.*, a maior parte delas envolvidas em mucilagem (CHORUS & BARTRAM, 1999).

As espécies filamentosas possuem heterocistos, células de paredes espessas responsáveis pela fixação do nitrogênio molecular (N_2). Esta fixação do nitrogênio ocorre porque, ao contrário de outras células do filamento, os heterocistos não produzem oxigênio, o que permite ambiente anóxico para o funcionamento das nitrogenases, enzimas que fazem a fixação biológica do nitrogênio e são inativas na presença de oxigênio. Assim, na fixação do nitrogênio, utiliza-se carbono como fonte de energia (SANT'ANNA et al., 2006).

Algumas espécies, quando as condições do meio não são favoráveis, produzem estruturas denominadas acinetos, células de resistência ou esporos, com paredes espessas, que

acumulam reservas de energia sob a forma de grânulos de cianoficina. Os acinetos, assim como os heterocitos originam-se de células vegetativas, que podem aumentar de tamanho para estocar esta grande quantidade de substâncias de reserva (SANT'ANNA *et al.*, 2006).

Além de clorofila-a, as cianobactérias possuem outros pigmentos protéicos solúveis em água, genericamente denominados ficobilinas (ficocianina e ficoeritina) e xantofila (pigmentos acessórios que são carotenóides amarelados). Todas as cianobactérias contêm clorofila-a e ficocianina (DOUGLAS, 1994).

Segundo Yoo *et al.* (1995), uma das ficobilinas, a ficocianina, parece ser azul porque absorve comprimento de onda de luz na banda vermelha do espectro e reflete na banda azul. A ficocianina atua como pigmento acessório durante a fotossíntese pela fixação da energia luminosa, principalmente na banda vermelha, especialmente entre 625 e 630 nm. A combinação do efeito visual verde-azulado da ficocianina e o verde da clorofila-a cria a aparência azul-esverdeada desses microorganismos.

De forma diferente da ficocianina, a clorofila-a fixa luz principalmente no comprimento de onda azul. Assim, a cianobactéria tem vantagem ecológica no ambiente aquático, porque pode utilizar luz em ambos os extremos do espectro visível: no comprimento de onda vermelha, que penetra até o fundo da coluna de água, e no comprimento de onda azul, que geralmente se extingue em menor profundidade (PAERL, 1998).

Várias espécies de cianobactérias, que formam florações, produzem toxinas denominadas cianotoxinas. As causas para essa produção ainda não estão bem esclarecidas, mas alguns pesquisadores acreditam que as cianotoxinas desempenham funções protetoras contra espécies zooplancônicas, seus predadores primários, como fazem algumas plantas vasculares ao produzirem taninos, fenóis, alcalóides ou esteróides (CALJURI *et al.*, 2006).

As toxinas biossintetizadas por cianobactérias constituem um grupo quimicamente heterogêneo apresentando, portanto diferentes propriedades toxicológicas. Muitas cianotoxinas correspondem à endotoxinas, ou seja, depois de sintetizadas no citoplasma celular, permanecem dentro da célula e só são liberadas na água após a lise ou morte celular (exemplo: microcistina). Outras são exotoxinas, ou seja, podem ser excretadas pela célula

mesmo em condições fisiológicas normais, por exemplo: cilindrospermopsina (CEBALLOS *et al.*, 2006).

As cianotoxinas pertencem a três classes químicas distintas: peptídeos cíclicos hepatotóxicos, alcalóides e lipopolissacarídeos (LPS), e de acordo com sua ação farmacológica, são classificadas em neurotoxinas, hepatotoxinas e dermatotoxinas (SIVONEM & JONES, 1999).

As neurotoxinas são alcalóides do tipo carbamato, que atuam especificamente no sistema nervoso, mesmo em baixa concentração. Atuam na transmissão dos impulsos nervosos, provocando morte por paradas respiratórias (HAWSER *et al.*, 1991; KAEBERNICK & NEILAN, 2001).

As neurotoxinas são produzidas principalmente pelos gêneros: *Anabaena sp.*, *Aphanizomenon sp.*, *Oscillatoria sp.*; *Trichodesmium sp.*; *Lyngbya sp.*, *Cylindrospermopsis sp.* Os tipos de neurotoxinas produzidas a partir de espécies desses gêneros são: anatoxina-a, anatoxina-a (s), saxitoxinas (SXT), neosaxitoxinas (Neo-SXT) e homoanatoxina-a (AZEVEDO, 1998).

As hepatotoxinas incluem peptídeos cíclicos que compreendem as microcistinas e as nodularinas, e um alcalóide, a cilindrospermopsina. As hepatotoxinas agem principalmente no fígado. Muitas hepatotoxinas não têm nenhuma atração especial pelo tecido hepático, mas como o fígado concentra toxinas na tentativa de degradá-las, as toxinas acabam atuando mais nesse órgão. A cilindrospermopsina causa também lesões em outros órgãos, como rins, coração, pulmões e mucosa gástrica (KUIPER-GOODMAN *et al.*, 1999).

Segundo Carmichael (1991) e Roset *et al.* (2001), as intoxicações mais comuns por cianobactérias são provocadas por hepatotoxinas, comumente peptídeos cíclicos hepatotóxicos. São exemplos de hepatotoxinas aquelas isoladas de *Microcystis sp* e dos gêneros *Anabaena flos-aquae*, *Nostoc rivulare* e *Oscillatoria agradhii*, e a *Nodularia spumigena*.

As dermatotoxinas, toxinas irritante ao contato com a pele, são compostos tóxicos produzidos por cianobactérias causadoras de danos menores que os causados por hepatotoxinas e neurotoxinas. São produzidas por todos os gêneros de cianobactérias e causam a seguinte sintomatologia: vermelhidão e lesões na pele, irritação nos olhos, conjuntivite, urticária, obstrução nasal e asma (CALIJURI *et al.*, 2006).

A toxicidade das cianobactérias varia de espécies para espécie, dentro dos gêneros pode haver cepas produtoras e não produtoras de toxinas (ZAGATTO & ARAGÃO, 1997; ZAGATTO, 2001).

As primeiras intoxicações registradas em populações humanas, causadas pelo consumo de água contaminada por cepas tóxicas de cianobactérias, foram descritas na Austrália, Inglaterra, China e África do Sul (FALCONER, 1994).

No Brasil são relatados alguns casos, dos quais o mais grave foi o episódio de Caruaru, em 1996, quando 123 pacientes de uma clínica de hemodiálise tiveram quadro clínico indicativo de síndrome de intoxicação hepática. Morreram 60 desses pacientes. A investigação revelou que a intoxicação foi causada pela água da hemodiálise contaminada por cianotoxinas (AZEVEDO, 1998).

As cianobactérias e microalgas são constante fonte de preocupação para os operadores de estações de tratamento de água. A remoção desses organismos é muito difícil por causa do tamanho, do baixo peso específico, da baixa densidade celular e da carga superficial negativa, que influenciam nas características dos focos formados (EDZWALD, 1993).

A presença de microalgas e cianobactérias na água bruta aduzida às estações podem causar problemas operacionais em várias etapas de tratamento, tais como: dificuldade de coagulação e floculação, baixa eficiência do processo de sedimentação, colmatação dos filtros e aumento dos subprodutos da desinfecção.

Como conseqüências desses problemas operacionais, podem surgir na água tratada, características associadas à presença de microalgas, cianobactérias e seus produtos extracelulares: sabor e odor, formação de trihalometanos (THM) e corrosão de unidades do sistema de abastecimento.

Assim, a sedimentação torna-se ineficiente para a remoção de algas e cianobactérias devido à baixa densidade celular. Nas etapas de coagulação e floculação, altas dosagens de produtos químicos são requeridas para neutralizar a carga superficial desses microrganismos, gerando um alto volume de lodo na estação, além de possível lise celular (EDZWALD, 1993; VLASKI *et al.*, 1996).

A flotação por ar dissolvido (FAD) é um método alternativo à sedimentação para melhorar a etapa de clarificação. Santiago (2008) estudou a eficiência da remoção de cianobactérias por meio de FAD, realizando uma pesquisa em escala de bancada sobre a remoção de duas espécies: *Cylindrospermopsis raciborskii* e *Microcystis protocystis*. Foram empregados dois tipos de coagulantes: sulfato de alumínio e cloreto de férrico. Delinearam-se as seguintes conclusões:

- A morfologia das células de cianobactérias influenciou o processo de flotação e que, a *Cylindrospermopsis raciborskii*, espécie filamentososa, é removida com mais dificuldade;
- O sulfato de alumínio apresentou desempenho superior ao cloreto férrico nos ensaios de FAD;
- O sulfato de alumínio foi o coagulante mais adequado para remover células cocóides do que filamentosos.

No que diz respeito às cianotoxinas, de acordo com Hart *et al.* (1998), vários estudos têm mostrado que os processos convencionais de tratamento (coagulação/floculação, sedimentação e filtração) não são efetivos na remoção total da fração dissolvida.

Karner *et al.* (2001) avaliaram a ocorrência de microcistinas na água bruta e no ponto final de cinco estações no estado de Wisconsin, EUA. Por meio das análises com o kit ELISA, o estudo concluiu que foi possível remover de 1 – 3 log na concentração desta toxina nestas estações de tratamento convencional testadas durante 1998.

Em escala de laboratório, estes processos apresentaram resultados efetivos na remoção de cianotoxinas: a adsorção em carvão ativado (FALCONER *et al.*, 1989; HART *et al.*, 1998), e a pós-oxidação com ozônio (HIMBERG *et al.*, 1989; HART *et al.*, 1998).

Hart *et al.* (1998) ressaltam a importância do controle do tipo e da dosagem de carvão ativado em pó aplicada. Acrescentam que, a ozonização pode levar rapidamente à completa destruição da microcistina, da nodularina e da anatoxina-a com a adição de 2 mg L⁻¹ deste oxidante.

Viana (2006) avaliou o desempenho, em escala de bancada, da remoção de saxitoxinas por meio de adsorção em carvão ativado e oxidação. Os resultados apontaram que a eficiência de remoção, para a adsorção, está intrinsecamente relacionada ao tipo de carvão e à dosagem empregada, obtendo a máxima eficiência de remoção de 68 % para os carvões de osso e madeira. Nestes ensaios, a concentração de saxitoxinas obtida após o emprego das técnicas de remoção foi superior ao limite recomendado pela Portaria MS nº 518/2004 ($3,0 \mu\text{g L}^{-1}$).

Em relação à oxidação, para os dois tempos de contato (30 e 60 minutos) e as dosagens avaliadas (0,9; 1,2 e $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de hipoclorito de cálcio), Viana (2006) concluiu que a eficiência de remoção, da ordem de 80 %, manteve-se praticamente constante, atendendo ao estabelecido pela Portaria 518.

Nicholson *et al.* (1994) estudaram o uso de cloraminas e de dióxido de cloro na destruição de hepatotoxinas, e concluíram que estes oxidantes não são eficazes na remoção destas cianotoxinas.

Sens *et al.* (2006) mostraram que é possível remover totalmente as células de cianobactérias, principalmente a espécie *Cylindrospermopsis raciborskii*, pelo processo de filtração em margem, realizado na Lagoa do Peri, situada na cidade de Florianópolis (SC). Entretanto, os resultados obtidos, com relação à remoção de cianotoxinas, devem ser vistos com a devida cautela, pois as concentrações encontradas no manancial estudado foram pequenas, não representando uma situação crítica.

Na Portaria do Ministério da Saúde Nº 518/2004 **recomenda-se** que as análises para cianotoxinas incluam a determinação de cilindrospermopsinas e saxitoxinas (SXT), observando, respectivamente, os valores limites de $15,0 \mu\text{g L}^{-1}$ e $3,0 \mu\text{g L}^{-1}$ de equivalentes de STX L^{-1} .

Esta Portaria acrescentou, no parágrafo 5º do artigo 18, sempre que o número de cianobactérias na água do manancial, no ponto de captação, exceder 20.000 células/mL (mais de $2 \text{ mm}^3 / \text{mL}$ de biovolume), durante o monitoramento, será exigida a análise semanal de cianotoxinas na água da saída do tratamento e nas entradas (hidrômetros) das clínicas de hemodiálise e indústrias de injetáveis. No entanto esta análise pode ser dispensada quando

houver comprovação de ausência de cianotoxinas na água bruta por meio da realização semanal de bioensaios em camundongos.

No estado de Minas Gerais, em outubro de 2007, houve uma contaminação dos rios das Velhas, São Francisco e Doce que deixou em estado de alerta 57 cidades das regiões Central, Norte e Leste de Minas Gerais. A alta concentração de cianobactérias nos cursos d'água e pôs em risco a saúde da população ribeirinha, principalmente do município de Várzea da Palma, no Norte de Minas, situado a 300 km de Belo Horizonte. Durante o período de floração, foram proibidos a pesca e qualquer contato com a água. Este fato exigiu que a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) fizesse mudanças no tratamento nos pontos de captação para abastecimento de todas as localidades ameaçadas (TUPINAMBÁS & RIBEIRO, 2007).

O crescente aumento de florações de cianobactérias em mananciais do Brasil e em vários locais da Terra e a expansão da tecnologia de separação por membranas em todo o globo reforçam ainda mais o objetivo da presente dissertação. Pode-se ressaltar que em escala piloto, ainda precisa-se encontrar, discorrer e divulgar mais resultados no Brasil acerca do emprego desta tecnologia na remoção de algas e cianobactérias.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Considerações gerais

Decidiu-se que o experimento piloto não poderia ser realizado em laboratório, devido ao grande volume de água a ser usado nos ensaios, que consumiria uma elevada concentração de cianobactérias. Assim foi decidido procurar um corpo d'água na Região Metropolitana de Belo Horizonte, onde houvesse freqüentes florações, e atendesse bem a logística do projeto. Deste modo, para realização dos ensaios com o conjunto-piloto de ultrafiltração, foi escolhida uma área pertencente ao Iate Tênis Clube, às margens da Lagoa da Pampulha, localizada na região norte de Belo Horizonte (Figura 4-1).



Figura 4-1: Localização do experimento na orla da Lagoa da Pampulha (fonte: Google Earth, 2008).

A Lagoa da Pampulha, com espelho d'água de 100 km², abrange parte dos municípios de Belo Horizonte, e Contagem, onde se localizam dois distritos industriais. Com o processo de urbanização, as águas da Lagoa tornaram-se impróprias para o abastecimento já no final da década de 1970, inviabilizando outros usos como atividades esportivas e de lazer, até então

desfrutadas pela população da cidade. Este processo contribuiu para o assoreamento de parte da represa, provocando a perda de 20% de seu espelho d'água e de 50% de seu volume, e também para a deterioração da qualidade de suas águas, que encontram em estado eutrófico com altas concentrações de matéria orgânica, registrando freqüentes florações de algas inclusive cianobactérias (COUTINHO *et al.*, 2001).

A escolha deste local foi motivada pelo fato da ocorrência de florações de cianobactérias neste ambiente desde 1997, e foi complementada pelas excelentes condições - espaço, segurança, administração, outros - oferecidas pelo Iate Tênis Clube (Figura 4-2).



Figura 4-2: Iate Tênis Clube às margens da Lagoa Pampulha (fonte: METZ, 2008. Google Earth).

Na Lagoa da Pampulha, as florações, com aspecto de um visco esverdeado, passaram a ser muito freqüentes ao longo de toda orla a partir do final da década de 1990 (Figura 4.3).



Figura 4-3: Floração de cianobactérias na Lagoa da Pampulha (fonte: BARBOSA, E., 2006).

4.2 Instalação, descrição e monitoramento do conjunto-piloto

Para realização desta pesquisa, à margem da Lagoa, foi construída uma instalação de 12 m² para abrigar a unidade de ultrafiltração, reservatórios de polietileno e uma bomba centrífuga. No período de fevereiro a abril de 2008, com assessoria do Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH), foi montada a primeira unidade-piloto de ultrafiltração da UFMG, conforme mostrado na Figura 4-4.



Figura 4-4: Unidade-piloto de ultrafiltração na Pampulha

Em abril de 2008, foi iniciada a operação do conjunto-piloto sob responsabilidade de um técnico da empresa fornecedora do equipamento. Esta empresa presta assistência técnica e manutenção das membranas fabricadas pela multinacional General Eletric.

A unidade-piloto foi monitorada de abril a agosto de 2008, resultando um intervalo de 80 horas. Neste período, foram verificados e anotados os seguintes parâmetros de funcionamento do conjunto-piloto de ultrafiltração: vazão do permeado (QP), vazão do concentrado (QC) e pressão do sistema. Por meio destas medidas, também se analisou a variável perda de carga do sistema, e conseqüentemente, a colmatação da membrana ao longo do seu funcionamento.

As vazões de rejeito e permeado foram lidas em litros por minuto ($L \text{ min}^{-1}$). A pressão do sistema foi medida em *psi* (libra por polegada ao quadrado) e em kgf cm^{-2} simultaneamente no manômetro. Acrescenta-se que 1 *psi* (polegada por cm^{-2}) equivale a 6,89 kPa, ou aproximadamente 0,7 m de coluna d'água.

Nas primeiras 30 horas de operação do equipamento, a leitura dos parâmetros foi realizada no intervalo de 15 minutos durante cada ensaio. Finalmente, após familiarização com o processo de filtração em membranas, este intervalo foi alterado para 30 minutos.

Durante as leituras, também foi verificado o funcionamento da válvula solenóide, responsável pelos descartes temporários de concentrado. Programou-se o temporizador para o intervalo de 2 minutos com o objetivo de auxiliar a limpeza da membrana. Sendo que esta descarga de rejeito durava 10 segundos. Este sistema de descarga de concentrado mostrou-se muito eficiente em todo tempo de operação da estação-piloto.

Os principais constituintes desta unidade-piloto são:

- Um filtro de areia (tipo piscina), responsável pelo pré-tratamento do afluente recalcado da Lagoa da Pampulha. A retro-lavagem do filtro era realizada a cada 15 dias durante dois minutos antes de recomeçar o processo de ultrafiltração.

Este filtro de areia para piscinas, modelo Dancor DFR-11, tem 28 cm de diâmetro e vazão nominal de $2,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O meio filtrante é constituído de areia média 0,45 mm e tem 13 cm de altura. A área filtrante possui $0,06 \text{ m}^2$, obtendo uma altura manométrica total de $1,5 \text{ kgf cm}^{-2}$ na vazão nominal especificada anteriormente. Acrescenta-se, que o filtro depois

de carregado com areia e cheio de água, pesou por volta de 50 kg. Assim, instalou-se o filtro sobre uma base de concreto.

- Uma caixa de alimentação (500 L) que recebe a água pré-tratada do filtro de areia. Há dois sensores elétricos, interligados ao circuito do pré-filtro, que controlam os níveis mínimo e máximo desta caixa. Assim a caixa estará sempre fornecendo água pré-filtrada ao conjunto-piloto. Na Figura 4-5, mostram-se o filtro de areia, a caixa de alimentação e o circuito dos sensores elétricos preso em um tubo de PVC branco.

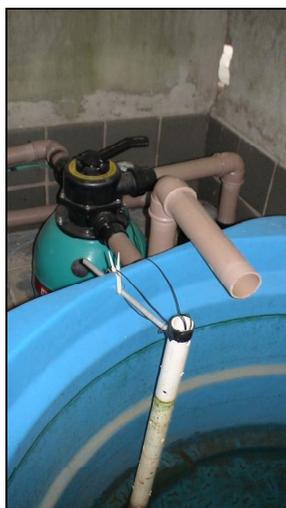


Figura 4-5: Pré-filtro de areia e caixa de alimentação do sistema de UF.

- O conjunto-piloto constituía-se por membrana UF, painel elétrico, bomba de pressão, temporizador, válvulas de interligações em AISI 316, vaso de pressão, rotâmetros, manômetros, e uma válvula solenóide (Figura 4-6 e Figura 4-7).



Figura 4-6: Vistas do conjunto-piloto de filtração em membranas da UFMG.



Figura 4-7: Conjunto moto-bomba, rotâmetros, temporizador e manômetro.

A bomba de pressão foi construída em aço inox 304 e equipada com um motor trifásico (220/380 v) de 1,5 cv. O vaso de pressão tem capacidade de 300 psi (20 kgf cm⁻²) de operação à temperatura ambiente, e está preparado para receber membranas do tipo MF, UF e NF. Para membranas de OR, é necessário um adaptador.

A válvula solenóide, mostrada na Figura 4-8, é responsável pela realização de descarte (*flush*), conforme a programação do temporizador. Este recurso ajuda na limpeza do sistema, prorrogando a carreira de filtração da membrana. A programação está relacionada à qualidade da água a ser tratada e ao tipo de membrana.



Figura 4-8: Válvula solenóide programada para o flush do sistema.

- Duas caixas de 310 L e 500 L que são usadas para armazenamento, respectivamente, do concentrado e permeado.

A pressão de operação deste sistema montado, usando membrana de UF, pode variar no intervalo compreendido entre 138 kPa (20 psi) até 275 kPa (40 psi), através do controle de vazão na entrada do conjunto-piloto.

Em março de 2007, o conjunto-piloto foi comprado por R\$ 20.140,00. A estrutura da instalação de pesquisa montada custou R\$ 2.240,00. Estes recursos foram repassados pela Finep ao Prosab do Edital 5. O sistema de ultrafiltração foi monitorado durante 80 horas de forma intermitente no período de abril a agosto de 2008.

4.3 Membrana Filtrante

A configuração selecionada para a membrana foi aquela, de cujo módulo é formado por folhas planas dispostas em forma de uma espiral, sendo constituída por polietersulfona. Este material é um polímero orgânico que torna a superfície da membrana hidrofílica.

A membrana, usada no ensaio, é constituída pelo módulo de Ultrafiltração (UF) e semelhante à da Figura 4-9. O custo da membrana e do módulo foi aproximadamente R\$ 5 mil (US\$ 2300, em março/2007).



Figura 4-9: Vista frontal da membrana de UF PW 4040 F.

O peso molecular de corte da membrana é 10000 g mol^{-1} . O peso molecular de corte (PMC), definido durante o processo de fabricação da camada porosa da membrana, determina o menor tamanho do composto que pode ser rejeitado no processo de filtração escolhido.

A água pressurizada passa pelos poros desta membrana UF, descrevendo um fluxo tangencial ao tubo coletor do permeado, enquanto as substâncias com tamanho superior a $0,001 \mu\text{m}$ ficam retidas pela membrana. Procura-se manter constante o fluxo de operação da membrana, com o objetivo de maximizar a produção de permeado.

A membrana de ultrafiltração foi escolhida devido ao seu amplo uso no tratamento de água, o que tornou o seu preço comercial mais competitivo. Além de sua faixa de rejeição abranger muito bem os compostos estudados nesta pesquisa feita em escala piloto. A membrana de MF

foi descartada, pois tinha o preço de mercado bem próximo da UF na época da compra (Março, 2007).

As principais características desta membrana, enviadas pelo fornecedor, estão na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Caracterização da membrana de Ultrafiltração fabricada em polietersulfona.

<i>Temperatura máxima</i>	50° C
pH de operação para tratamento	3 – 11
pH de limpeza	2,0 – 11,5
Área de membrana modelo PW4040F	7,9 m ²
Fluxo operacional ou taxa de aplicação superficial	15 – 40 L h ⁻¹ m ⁻²
Vazão máxima possível	Aproximadamente 320 L h ⁻¹

4.4 Parâmetros de operação da ultrafiltração

Foram analisados os seguintes parâmetros para avaliar o desempenho da unidade:

- Pressão de filtração

Variações bruscas na pressão podem indicar problemas no sistema como colmatção da membrana, sujeira nas válvulas do concentrado e operação incorreta da válvula do vaso de pressão. Através dos manômetros, também é feita a análise da perda de carga do sistema. Ao longo dos ensaios foram efetuadas variações da pressão (138 – 276 kPa). Os dados foram coletados, inicialmente, operando com pressão constante de 138 kPa (20 *psi*).

- Vazão de permeado e vazão do rejeito

No painel elétrico do sistema, há rotâmetros para medições de vazões tanto na linha do permeado como no rejeito (concentrado).

O monitoramento do fluxo da membrana é primordial para avaliar a eficiência da membrana escolhida no experimento, e posteriormente, se aquele tipo de conjunto-piloto poderá ser usado em um determinado sistema de tratamento.

Técnicos em membrana recomendam que na marca de 15 % no declínio de vazão, em qualquer um dos rotâmetros, é indício de sistema com colmatção. Então se deve realizar a operação de limpeza química da membrana. No entanto, deve-se estar atento à temperatura do efluente durante a operação de filtração em membranas, pois esta variável é diretamente proporcional à viscosidade do líquido.

A vazão de produção de permeado do sistema de separação em membranas depende da temperatura do efluente, pois está relacionada com a viscosidade, que influencia o fluxo de produção de permeado. Assim foram realizadas medidas de temperatura desde a montante do sistema (Lagoa da Pampulha) até o produto final (permeado). No entanto, nesta pesquisa, as amostras foram armazenadas em caixa de isopor, e uma hora depois, realizaram-se as medidas de temperatura no Laboratório. Embora, sempre que possível, recomenda-se obter a temperatura no local de realização do experimento.

- Eficiência de remoção de células de cianobactérias

Através das amostras coletadas em pontos escolhidos - citados no próximo item - ao longo do sistema, foi calculada a remoção de células de cianobactérias em unidades logarítmicas. A principal comprovação de eficiência da membrana de UF foi feita através das análises na linha do concentrado e do permeado.

4.5 Pontos de coletas

Para todos os parâmetros analisados nesta pesquisa, foram coletadas amostras nos pontos descritos a seguir:

- a) Ponto I: na orla da Lagoa (captação de água bruta), situado antes da tomada d'água do conjunto-piloto;
- b) Ponto II: após o filtro de areia (PFA: ponto após pré-filtração no filtro tipo piscina);

- c) Ponto III: na linha do permeado (efluente tratado);
- d) Ponto IV: na linha do concentrado (efluente rejeitado no processo de ultrafiltração);
- e) Ponto V: na linha do descarte do concentrado programado pelo temporizador (*flush*).

Pode-se resumir o fluxo desta estação-piloto em três etapas fundamentais:

1. Captação na orla da Lagoa da Pampulha;
2. Pré-filtração por meio do filtro de areia;
3. Filtração em membrana UF.

As etapas e os pontos de coleta estão visualizados no foto-fluxograma apresentado na Figura 4-10.

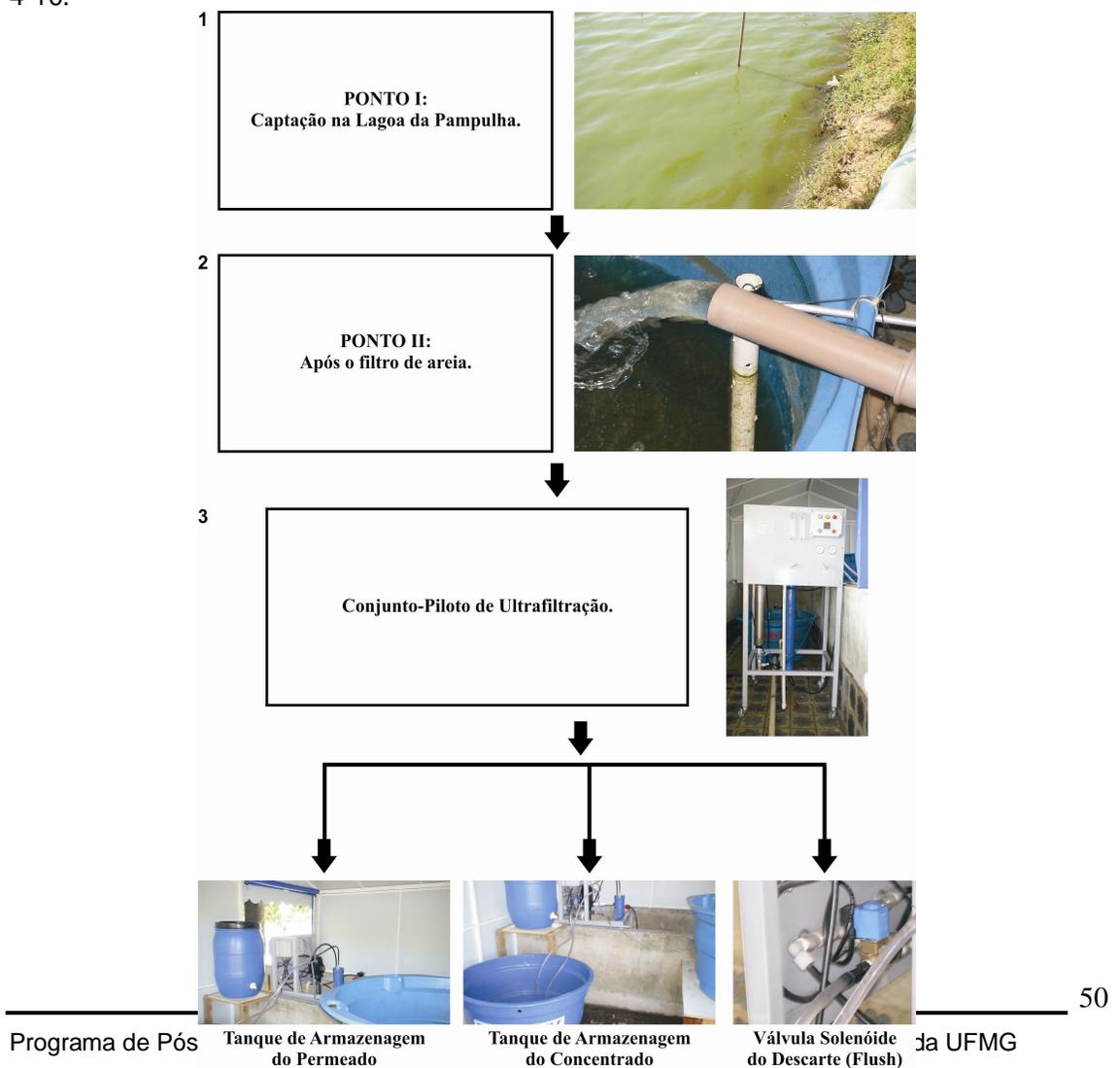


Figura 4.10: Foto-fluxograma do sistema de UF.

Assim o fluxograma de todas as etapas do processo da unidade-piloto de UF, às margens da Lagoa da Pampulha, pode ser claramente mostrado na Figura 4-11.

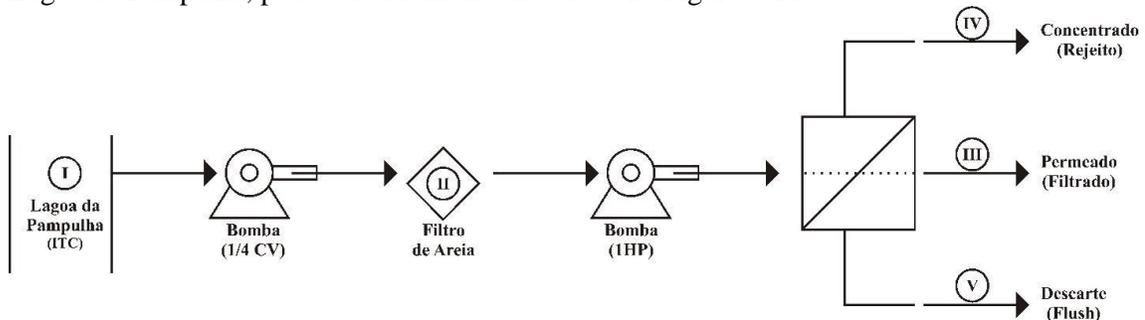


Figura 4-11: Fluxograma do processo da unidade-piloto de ultrafiltração em membrana.

4.6 Amostragem e preservação das amostras

Coletaram-se amostras, simultaneamente, para a contagem de fitoplâncton (algas e cianobactérias), e para a determinação dos seguintes parâmetros físico-químicos: pH, cor verdadeira, cor aparente, turbidez, alcalinidade total e dureza. A temperatura de cada amostra foi medida no Laboratório durante a realização das análises.

O estudo foi complementado com a realização de coletas para análises bacteriológicas (*Escherichia coli* e coliformes totais) e de cianotoxinas no ponto de captação e nos efluentes.

Para fixação das amostras, usou-se solução de lugol acético. O lugol é mais indicado para amostras destinadas à contagem de cianobactérias, em que há necessidade de grande manipulação de amostras. O lugol promove a coloração das células do fitoplâncton, e possui a vantagem de facilitar a sedimentação dos organismos na câmara de contagem.

Para realizar as análises quantitativas de algas e cianobactérias da lagoa, foram coletadas amostras de superfície usando um balde graduado de 10 L. A seguir, as amostras eram armazenadas em frascos âmbar 500ml com 2 mL de lugol e colocadas em uma caixa de isopor.

As coletas de amostras de florações de cianobactérias para avaliação de toxicidade foram realizadas bem na superfície, procurando coletar apenas a nata esverdeada.

4.7 Parâmetros físico-químicos

As análises dos parâmetros físico-químicos foram feitas no Laboratório de Análises Físicas, Físico-químicas e Químicas de Água e de Efluentes, gerenciado pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG.

Na Tabela 4-2, mostram-se os parâmetros físico-químicos escolhidos com o respectivo método de determinação por meio do *Standard Methods*, edição de 2005. Também são citadas as unidades de medidas.

Tabela 4-2: Parâmetros físico-químicos com respectivos métodos analíticos e unidades de medidas

Alcalinidade total	Titulometria 2320B	mg L ⁻¹
Dureza	Titulometria 2340C	mg/L CaCO ₃
Cor Verdadeira	Espectrofotometria 2120B, após filtragem em membrana de 45 µ	uH
Cor Aparente	Espectrofotometria 2120B	uH
Turbidez	Nefelometria 2130B	uT
Ph	Potenciômetro	

Foram coletadas e analisadas amostras dos quatro pontos selecionados do fluxograma: Lagoa da Pampulha, após pré-filtro de areia, permeado e concentrado.

Na Figura 4-12, podem ser vistos os principais equipamentos usados para determinar as concentrações das variáveis físico-químicas da pesquisa.

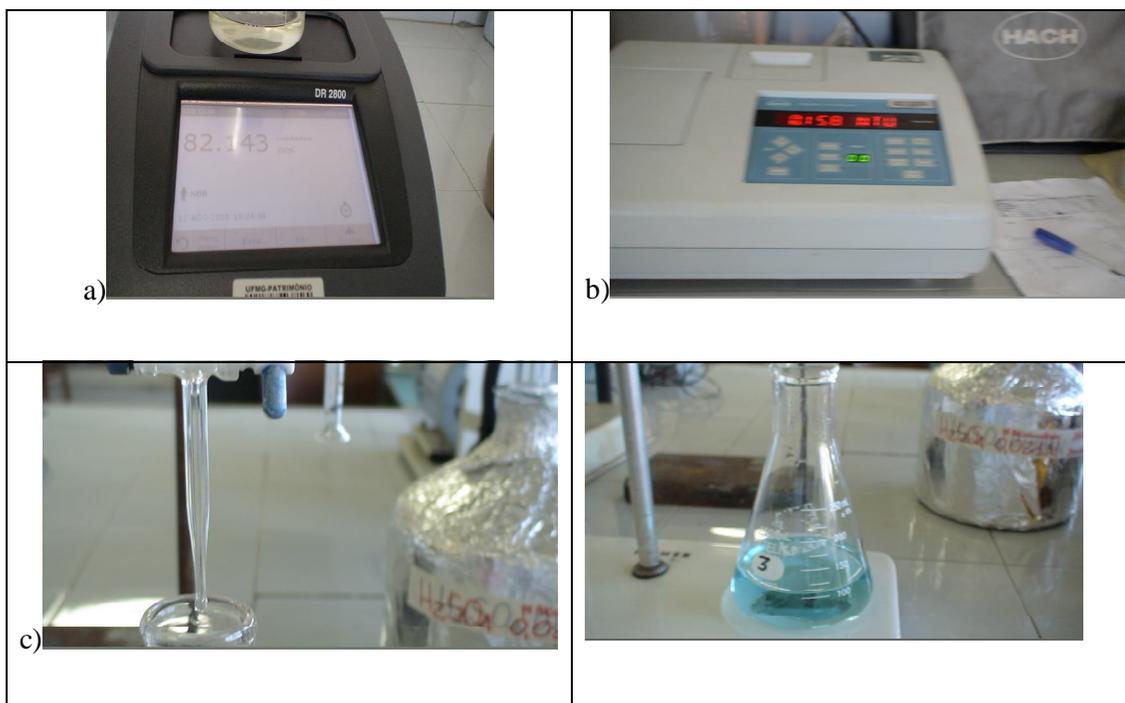


Figura 4-12: a) Espectrofotômetro, b) turbidímetro, c) material de Titulação.

4.8 Parâmetros biológicos

No laboratório de Microbiologia do DESA, foram realizadas as análises de *Escherichia coli* e coliformes totais. Para determinação destes organismos foi usado o método Colilert. No entanto, foi o usado o substrato da marca Colitag. Este substrato foi dissolvido em 100 mL da amostra. A seguir, a solução foi transferida para a cartela. A cartela, que após ser selada, foi armazenada numa estufa a 35,0 °C durante 24 horas. Após este intervalo, foram feitas as leituras de cada cartela.

Na Figura 4-13, apresenta-se a cartela, após 24 h de incubação na estufa, usada na análise bacteriológica. Os quadrantes amarelos indicam presença de coliformes totais na amostra. Somente são positivo para *Escherichia coli*, os quadrantes amarelos que emitirem fluorescência sob luz de ultravioleta.

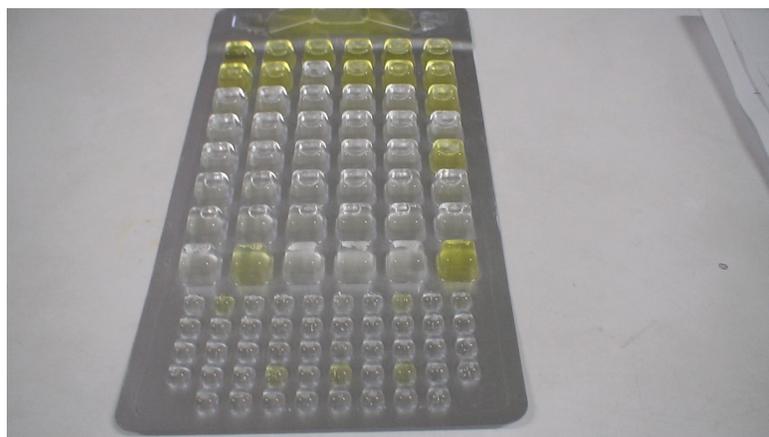


Figura 4-13: Cartela do Kit Colilert para análise de Coliformes totais e *Escherichia coli*.

Os resultados são expressos como número mais provável (NMP) de bactérias do grupo coliforme e/ou *Escherichia coli* por 100 mL, obtidos através da tabela própria para leitura da cartela. Caso os valores ultrapassem o valor máximo da tabela, diluições devem ser feitas para validação dos resultados.

Para estas análises, foram coletadas amostras nos pontos I (Lagoa da Pampulha), II (água pré-filtrada) e III (permeado).

4.9 Contagem de fitoplâncton

Os objetivos das análises de algas e cianobactérias foram quantificar a comunidade fitoplanctônica e determinar a concentração de cianobactérias ao longo do fluxo de tratamento na estação-piloto.

O método de contagem seguiu o item 10000, *Biological Examination*, na seção 10200 *Plankton*, do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2005).

Inicialmente, a contagem de células do fitoplâncton foi feita para todos os pontos. Porém, após o primeiro mês de coleta, o ponto V (*flush*) foi retirado, pois apresentou características semelhantes ao concentrado (ponto IV).

4.10 Detecção de cianotoxinas

Os testes de detecção de cianotoxinas foram feitos no Laboratório de Ficologia do Instituto de Biologia (ICB) da UFMG.

As amostras de cianobactérias foram submetidas à filtração a vácuo em microfiltro de fibra de vidro GF-1 de 47 mm. Os filtros foram dobrados e armazenados em papel alumínio. Após identificados, foram congelados.

O método empregado para análises de detecção de microscitina foi *Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Congener-Independent Determination of Microcystins and Nodulars in Water Samples*. O kit foi comprado de representante da empresa americana *ABRAXIS*.

As principais etapas deste método são:

- Extração das cianotoxinas;
- Diluição das amostras;
- Preparação da placa do Kit ELISA;
- Leitura da placa por meio de espectrofotometria, obtendo o valor de microcistina de cada amostra.

No teste, a concentração de microcistina é inversamente proporcional a cor que se desenvolva na placa.

O método empregado para análises de detecção de saxitoxinas foi a cromatografia líquida (HPLC).

A extração de saxitoxinas constituiu-se destas etapas:

1. A amostra de seston foi concentrada através de um filtro de boro-silicato e liofilizada (40 – 50 mg de seston);

2. Os filtros foram colocados em um béquer e nele adicionado uma solução de 0,05 M de ácido acético em um volume suficiente para cobri-los (aproximadamente 1 mL);
3. Agitação e ultrassonicação de cada amostra (sonicar por 30 – 40 segundos);
4. Coletar o sobrenadante de cada amostra, a seguir, centrifugar todas as amostras durante 10 minutos à rotação de 3500 RPM;
5. Repetir 3x os procedimentos 2, 3 e 4;
6. Juntar todo o extrato em Ependorf e centrifugar;
7. O sobrenadante é filtrado através da unidade filtrante de nylon 0,45 mm, antes da análise por cromatografia líquida (HPLC).
8. Guarde as análises em geladeira até a análise.

4.11 Quantificação das amostras

Na Tabela 4-3, apresenta-se o número de análises realizadas para cada parâmetro escolhido neste estudo.

Tabela 4-3: Quantificação das análises realizadas.

Parâmetro	Número de análises
Cor aparente	20
Cor verdadeira	20
Turbidez	20
pH	20
Alcalinidade total	20
Dureza	20
Contagem de fitoplâncton	20
<i>Escherichia coli</i>	10
Coliformes totais	10
Detecção de microcistina	14
Detecção de saxitoxinas	8

4.12 Limpeza química da membrana de UF

A operação de limpeza química foi realizada, promovendo-se, inicialmente, após fechar a válvula de concentrado, o enxágüe da membrana com o permeado produzido durante 10 minutos.

Recomenda-se a limpeza com solução aquosa de hidróxido de sódio 0,05% (500 mg L^{-1}) e detergente 0,01% (1000 mg L^{-1}) para filmes orgânicos. Se de origem mineral, deve-se adicionar ácido fosfórico em água até alcançar o pH na faixa de 2,0 até 2,5. Pode-se usar, também, solução de EDTA 1% (10000 mg L^{-1}) com pH máximo de 11,4.

Após o descarte do permeado, a solução de hidróxido de sódio foi circulada no sistema durante 1 hora. Esta solução, a seguir, ficou 15 minutos em repouso no sistema de ultrafiltração antes de ser descartada.

Para controle de proliferação de microorganismos na membrana, usou-se uma solução comercial de ácido peracético (Proxitane, Divosan, Minncare) em concentração de 1%. Em média, 100L de solução é aplicada ao fluxo ascendente do conjunto-piloto durante 15 minutos. No próximo passo, esta solução ficou 10 minutos em repouso no equipamento. Após o descarte deste ácido, foi feito o enxágüe final da membrana, circulando 100L de permeado durante 15 minutos.

Após a limpeza química, aconselha-se analisar o pH do permeado, que deve situar-se na faixa de operação da membrana usada no experimento.

O intervalo de tempo entre uma limpeza e outra está entre 30 e 45 dias, dependendo das características do afluente ao sistema de filtração.

Ao término da pesquisa foi realizada a única limpeza química da membrana. Ressalta-se que o sistema foi operado durante 80 horas de maio a agosto de 2008. A seguir, foi realizado o descomissionamento da primeira unidade-piloto de tecnologia de separação em membrana da UFMG.

4.13 Análises Estatísticas

A estatística descritiva dos dados foi realizada com o auxílio do software **Statistica 6.1**.

Foram utilizadas as seguintes ferramentas estatísticas:

- Gráficos de séries temporais para avaliação do período de ocorrência das principais espécies encontradas na Lagoa da Pampulha.
- Estatística básica como cálculos de medidas centrais e de dispersão dos principais parâmetros avaliados.
- Construção de gráficos de linha, diagramas de barras e Box-Whisker para apresentação das principais variáveis estudadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Monitoramento do conjunto-piloto

Na Tabela 5-1, são apresentadas algumas das anotações feitas para monitoramento e avaliação do desempenho do conjunto-piloto durante as 80 horas. Nesta tabela, são mostrados os valores de vazão de permeado (QP) e de vazão de concentrado (QC) com respectivos horários de leitura e dias de operação do sistema de ultrafiltração, além do valor de pressão constante usado no ensaio.

Tabela 5-1: Monitoramento do conjunto-piloto de ultrafiltração.

Data	Horário da leitura	QP (L/min)	QC (L/min)	Pressão do sistema (psi) e (kPa)	Tempo total de Operação
08/04	14h20min	2,0	2,0	20 <i>psi</i> (138 kPa)	1h 30min
15/04	15h22min	3,0	3,5	20	2h 35min
15/04	15h37min	3,0	3,5	20	2h 50min
23/04	9h 45min	3,0	3,0	20	3h 50min
23/04	10h	3,0	3,0	20	4h 05min
30/05	15h 10min	3,8	2,8	25 <i>psi</i> (173 KPa)	21h 25min
30/5	15h 40min	3,8	2,8	25	21h 55min
24/06	9h 40min	4,0	4,0	25	26h 35min
24/06	10h 10min	4,0	4,0	25	27h 05min
09/07	11h 10min	5,0	3,5	40 <i>psi</i> (276 kPa)	36h
18/07	9h 30min	4,0	2,0	30 <i>psi</i> (207 kPa)	46h
18/07	10h	3,8	2,2	30	46h 30min
18/07	10h 30min	4,0	2,0	30	47h
18/07	11h	3,8	1,8	30	47h 30min
07/08	9h 25min	2,5	2,0	20	51h 48min
07/08	9h 55min	2,3	2,0	20	52h 18min
07/08	10h25min	2,3	2,0	20	25h 48 min

Por meio deste monitoramento, observou-se que, após 46 horas de operação, o conjunto-piloto começou a apresentar queda na vazão de permeado. Por volta de 60 horas de operação,

registrava-se uma queda de 15% no valor de vazão de permeado adotado no início da operação do sistema. A limpeza química da membrana foi feita apenas ao final de toda pesquisa, depois de 80 horas.

A redução de fluxo através da membrana pode ser devido ao fenômeno da concentração-polarização. Neste fenômeno ocorre uma acumulação de material da superfície da membrana (tortas, biofilmes bacterianos, gel, sais precipitados), formando, logo acima, a camada de concentração-polarização. Ressalta-se que neste conjunto-piloto de UF, há uma válvula solenóide (*flush*) com temporizador para descarte, com a função de diminuir a concentração de materiais precipitados na superfície da membrana.

O sistema de ultrafiltração foi submetido à variação de pressão neste período. A faixa de pressão situou-se entre 138 kPa (20 *psi*: menor leitura na escala do manômetro) e 276 kPa (40 *psi*: valor máximo recomendado pelo fabricante para esta membrana de UF).

No entanto, após análises físico-químicas e contagem de fitoplâncton, concluiu-se que não houve alterações significantes nos resultados obtidos neste intervalo de pressão. Então, se tomou a decisão de trabalhar o sistema à pressão constante de 20 *psi* (138 kPa), em busca de preservar a vida útil da membrana e economizar energia elétrica durante o processo de ultrafiltração. Nesta pressão, conseguiu-se uma produção regular de permeado, chegando a 240 L h⁻¹ de vazão máxima neste conjunto-piloto frequentemente.

Mais tarde, após a realização das análises de microcistinas, que serão apresentadas no item 6.6, observou-se que não houve indicativo de lise celular a esta pressão, devido à ausência desta toxina no permeado.

Não foi feita a correção dos valores de vazão devido às mudanças de temperatura na Lagoa da Pampulha, conseqüentemente da viscosidade da água bruta, pois não se realizaram cálculos com esta variável.

5.2 Análises Físico-químicas

As análises físico-químicas foram feitas no período de 15 de maio a 21 de agosto de 2008 no Laboratório de Análises Físicas, Físico-químicas e Químicas de Água e de Efluentes localizado na Escola de Engenharia da UFMG.

Na Figura 5-1, são mostrados a água bruta e os principais efluentes do processo de ultrafiltração avaliado, seguindo o fluxograma apresentado: a água bruta de qualidade deteriorada captada na Lagoa da Pampulha; o efluente concentrado (rejeitado pela da membrana), e o permeado (efluente filtrado na unidade de UF). Nota-se perfeitamente como o permeado é bastante cristalino. Assim, também, pôde-se constatar que o permeado atende aos critérios estéticos e organolépticos.

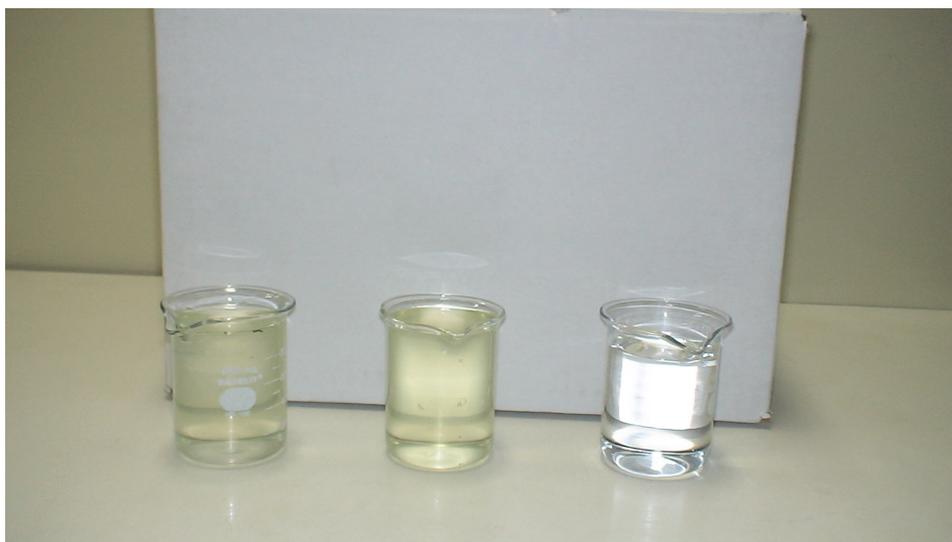


Figura 5-1: Processo de ultrafiltração: água bruta, concentrado e permeado.

O permeado e o efluente concentrado foram dispostos no jardim do Iate Tênis Clube. Estudos sobre a composição e adequação do concentrado e o impacto ambiental devido à disposição deste efluente não foram feitos nesta pesquisa.

Os resultados das análises de dureza total e alcalinidade estão representados, respectivamente, na Figura 5-2 e na Figura 5-3.

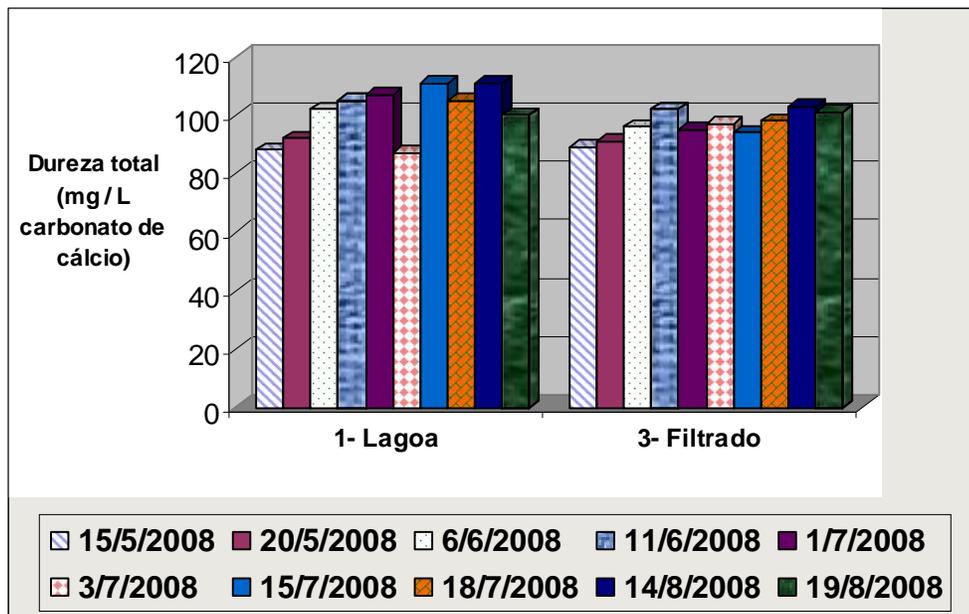


Figura 5-2: Monitoramento do parâmetro Dureza Total no ponto de captação e no efluente filtrado.

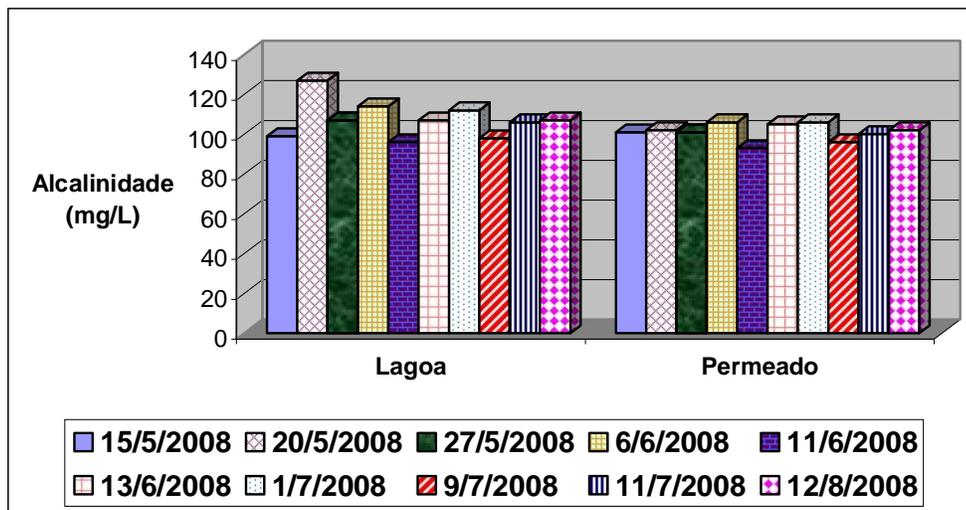


Figura 5-3: Monitoramento do parâmetro Alcalinidade na água bruta e no permeado.

A membrana de ultrafiltração não remove Alcalinidade e Dureza total. Estes parâmetros estão relacionados às substâncias dissolvidas na água bruta como carbonatos, bicarbonatos de cálcio, magnésio, íons de alumínio, de ferro e manganês. Assim a faixa de rejeição da membrana UF não abrange grande parte destes compostos dissolvidos no afluente.

Recomenda-se a remoção de sais dissolvidos para as tecnologias de nanofiltração e osmose reversa, como na dessalinização de águas.

Os dados do parâmetro turbidez no ponto de captação são mostrados na Figura 5-4. Nota-se a grande variação na turbidez da Lagoa da Pampulha neste período de monitoramento. Esta variabilidade não prejudicou o rendimento da membrana de ultrafiltração, conforme será descrito à frente.

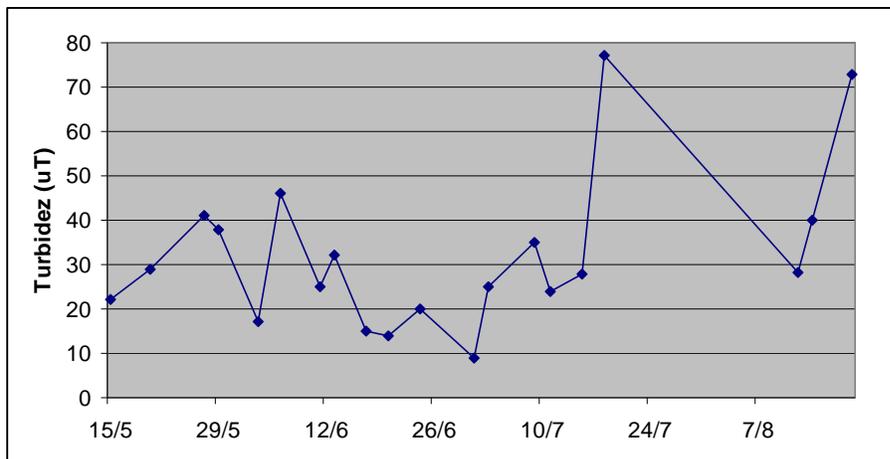


Figura 5-4: Monitoramento da turbidez no ponto de captação (I)

A turbidez do permeado é um indicador muito importante para avaliação do desempenho da tecnologia de filtração em membranas. A qualidade do efluente tratado é monitorada, e pode-se acompanhar o desenvolvimento da colmatção da membrana selecionada.

Os valores de turbidez do permeado obtidos ficaram abaixo de 0,45 uT durante todo período de operação da unidade de ultrafiltração. Este valor atende o padrão de turbidez para água, após a etapa de filtração, estabelecido pela Portaria 518 (o valor máximo permitido é de 1,0 uT, sendo a recomendação de 0,5 uT).

Na Figura 5-5, apresentam-se os valores de turbidez do permeado desde o início de operação da unidade-piloto (8/4/2008) até por volta de 65 horas de funcionamento do sistema de ultrafiltração.

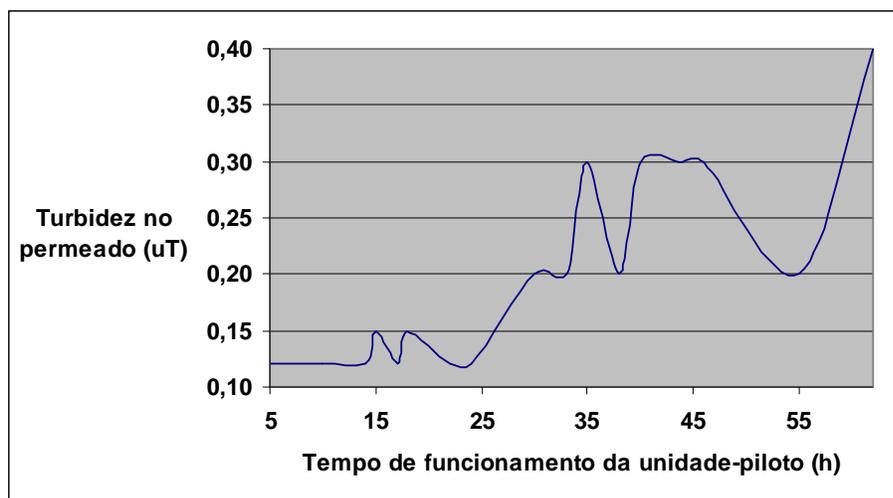


Figura 5-5: Monitoramento do parâmetro turbidez no permeado.

Considerando, que a variação da turbidez no ponto captação não foi significativa neste intervalo de monitoramento, observa-se um acréscimo do valor da turbidez ao longo do monitoramento devido provavelmente à colmatação da membrana durante as primeiras horas de operação, conforme mostrado na figura 5-5. Esta colmatação não foi devida às microalgas e/ou cianobactérias, pois não se encontrou concentração de fitoplâncton no permeado. Além disso, no rejeito, a concentração de microalgas e a de cianobactérias tinha a mesma ordem de grandeza daquelas analisadas no ponto situado após a pré-filtração.

O fenômeno de concentração-polarização pode ter sido responsável pela colmatação da membrana também. No entanto, nesta pesquisa, não foi feita nenhuma análise do mecanismo de bloqueio dos poros da membrana de ultrafiltração.

Avaliaram-se a cor verdadeira e cor aparente nos principais pontos do fluxograma, cujos resultados são apresentados na Figura 5-6 e na Figura 5-7.

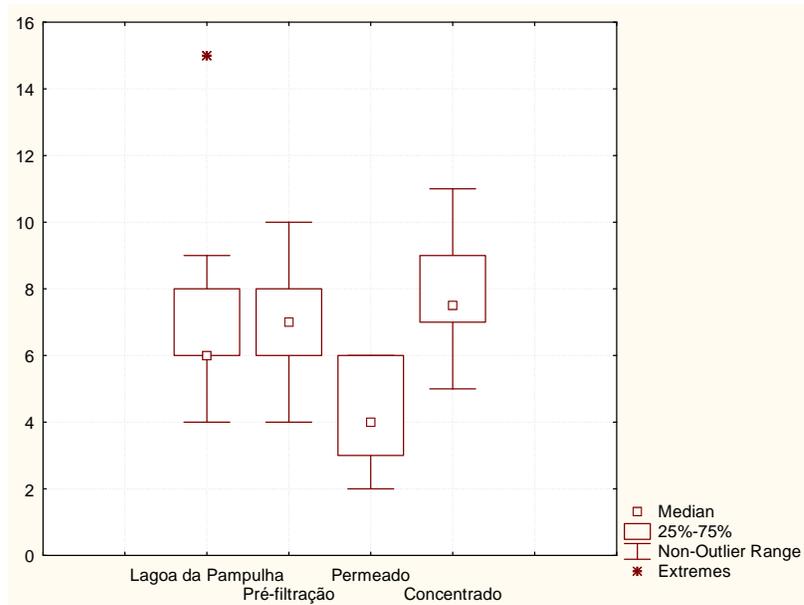


Figura 5-6: Monitoramento do parâmetro cor verdadeira ao longo do tratamento

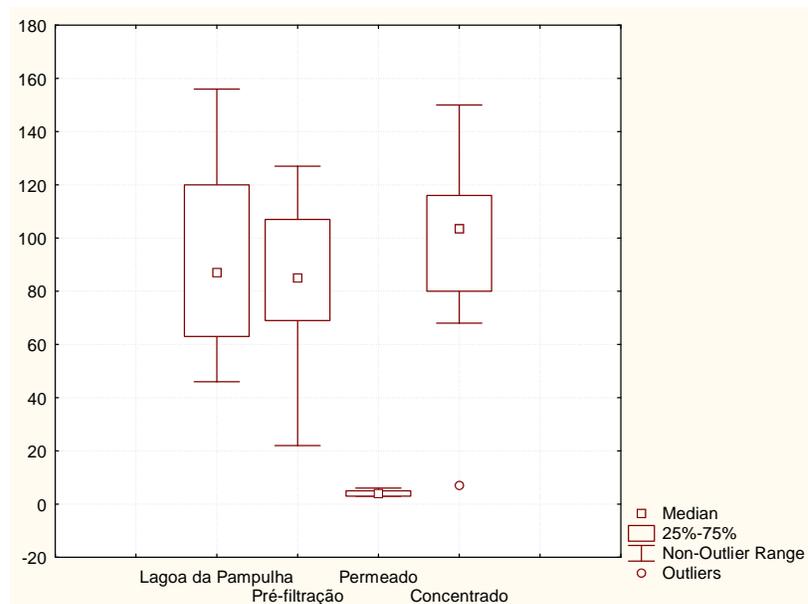


Figura 5-7: Monitoramento de cor aparente nos principais pontos da unidade-piloto.

O processo de ultrafiltração selecionado obteve excelente remoção de cor aparente, superando 90% conforme Tabela 5-2. Este desempenho está relacionado à capacidade da membrana de ultrafiltração em rejeitar colóides e macromoléculas orgânicas presentes na água bruta da represa. Durante toda operação, o valor encontrado ficou abaixo de 15 uH, que corresponde ao padrão vigente estabelecido pela Portaria 518/2004.

Tabela 5-2: Resultados de eficiência de remoção do parâmetro cor aparente no sistema de UF

Data	Cor aparente (uH) no ponto	Cor aparente (uH) após	Eficiência de
15/5/2008	95	4	95,7
20/5/2008	120	5	95,8
27/5/2008	156	6	96,1
29/5/2008	134	4	97,0
03/6/2008	73	4	94,5
06/6/2008	156	4	97,2
11/6/2008	88	5	94,3
17/6/2008	74	6	91,9
27/6/2008	86	8	90,7
01/7/2008	46	3	93,5
03/7/2008	63	4	93,7
09/7/2008	69	4	94,2
15/7/2008	71	7	90,1
18/7/2008	76	4	94,7
12/8/2008	82	3	96,3

A variável cor verdadeira não é citada pela Portaria atual (como de resto por outras legislações internacionais), no entanto, pode auxiliar no controle de subprodutos gerados após a etapa de desinfecção de um tratamento de água. Este parâmetro relaciona-se diretamente às substâncias dissolvidas na água. O sistema de ultrafiltração forneceu permeado com valores de cor verdadeira que, em algumas análises, aproximaram-se de 3 uH.

Para obtenção de valores de cor verdadeira, foi usada uma membrana de 45 µm para remoção da turbidez e, a seguir, foi realizada a leitura no espectrofotômetro.

O desempenho da membrana de ultrafiltração na remoção de cor verdadeira é mostrado na Figura 5-8, por meio de uma série temporal obtida dos dados de permeado. Observa-se que os valores estão compreendidos entre 3 uH e 6 uH durante todo o período de operação da unidade-piloto.

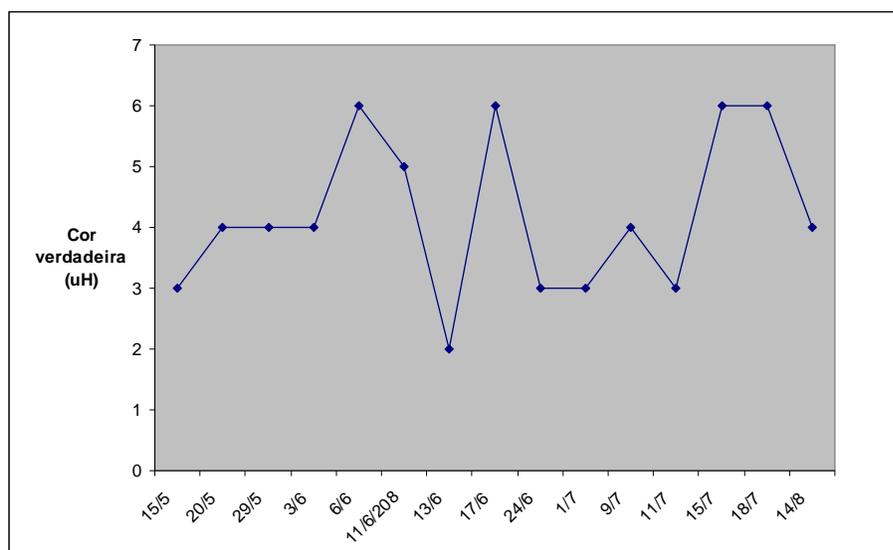


Figura 5-8: Cor verdadeira monitorada no permeado.

Estes resultados confirmam que o sistema de UF consegue remover uma elevada concentração de partículas responsáveis pela turbidez, cor verdadeira e cor aparente da água bruta da Lagoa da Pampulha, sem o emprego da coagulação.

5.3 Análises de fitoplâncton

A contagem do fitoplâncton foi realizada no período de 15 de maio a 8 de agosto. O objetivo destas análises foi a quantificação da comunidade fitoplanctônica e a determinação da concentração de cianobactérias ao longo do fluxo de tratamento na unidade-piloto para avaliar a eficiência de remoção destes organismos pela membrana de UF.

Em 2008, em meados de maio, já se podia observar florações de cianobactérias, destacando-se principalmente a dominância de *Cylindrospermopsis raciborskii* nesta biota. As florações, com aspecto de um visco esverdeado, passaram a ser freqüentes na orla da Lagoa da Pampulha.

Na Figura 5-9, são mostrados alguns espécies de algas e cianobactérias da comunidade fitoplanctônica na Lagoa da Pampulha: as algas *Trachelomonas volvocina* (células grandes e esféricas) e *Cryptomonas erosa*, e as cianobactérias *Sphaerocavum brasiliense* (agrupadas em colônia) e *Cylindrospermopsis raciborskii* (bastões cilíndricos).

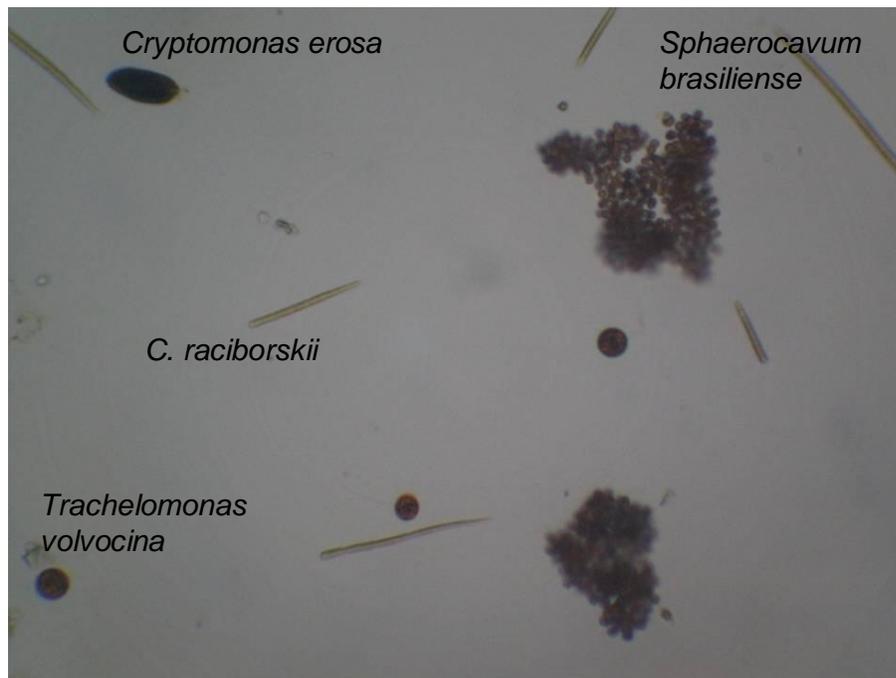


Figura 5-9: Microfotografia de espécies de microalgas e cianobactérias comuns na Lagoa da Pampulha (2008).

Na Tabela 5-3, apresentam-se os resultados da primeira análise hidrobiológica para caracterização quantitativa do fitoplâncton do ponto I, situado na orla do Iate Tênis Clube. As espécies de cianobactérias encontradas são destacadas nesta tabela.

Esta primeira análise foi realizada no dia 15 de maio de 2008. Nesta data, no ponto de captação, foram encontradas as seguintes espécies de cianobactérias: *Cylindrospermopsis raciborskii* e *Sphaerocavum brasiliense*.

Tabela 5-3: Resultados da primeira análise quantitativa do fitoplâncton no ponto I realizada em 15/5/2008.

Organismos	Classes	Células mL ⁻¹
<i>Chlamydomonas sp.</i>	Chlorophyceae	54
<i>Cryptomonas sp.</i>	Cryptophyceae	215
<i>Desmodesmus cf. opoliensis</i>	Chlorophyceae	108
<i>Dictyosphaerium pulchellum.</i>	Chlorophyceae	860
<i>Fragilaria sp.</i>	Bacillariophyceae	323
<i>Gomphonema sp.</i>	Bacillariophyceae	54
<i>Monoraphidium contortum</i>	Chlorophyceae	54
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cyanophyceae	117.204
<i>Pediastrum simplex</i>	Chlorophyceae	215
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlorophyceae	430
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyanophyceae	10.753
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Euglenophyceae	376
Totais (células/mL)		130.646 (1,3 x 10 ⁶)

Na Figura 5-10, apresentam-se as principais espécies de cianobactérias potencialmente tóxicas quantificadas no ponto de captação durante os quatros meses de coleta.

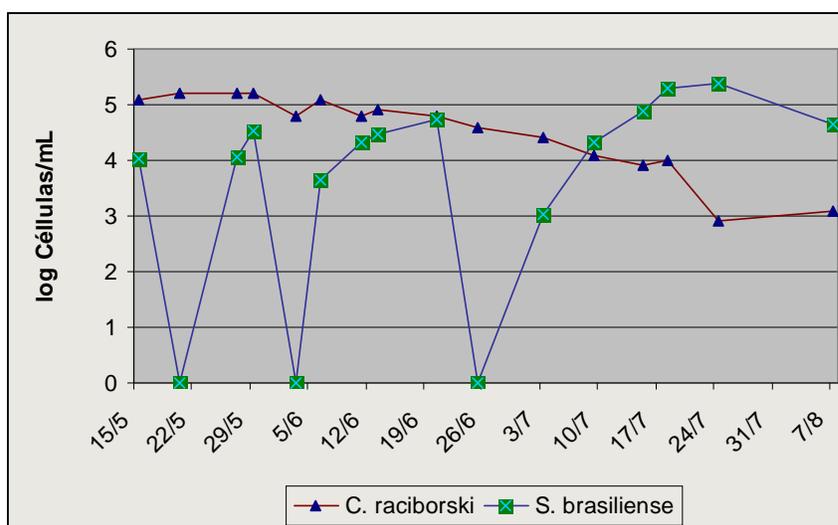


Figura 5-10: Série temporal dos principais gêneros de cianobactérias na água bruta.

Na primeira análise, o resultado da quantificação de cianobactérias se aproximou de $1,3 \times 10^5$ cel. mL⁻¹. Este valor encontrado é menos de uma unidade logarítmica daquele que indica a ocorrência de floração (*bloom*), 10^6 células mL⁻¹, adotado nas pesquisas com cianobactérias realizadas na rede ProSab.

É importante ressaltar que ocorreu a dominância da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* na comunidade fitoplânctônica da Lagoa da Pampulha durante quase todo período de coleta. O sucesso ecológico de *Cylindrospermopsis raciborskii* provavelmente está relacionado à capacidade de migração na coluna d'água, tolerância à baixa luminosidade, habilidade em utilizar fontes internas de fósforo, capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e resistência à herbivoria pelo zooplâncton (CHORUS & BARTRAM, 1999).

Outro fator provável poderia ser a variação de temperatura na Lagoa da Pampulha neste período. Com auxílio das Figuras 5-10 e Figura 5-11, pôde-se observar que a dominância da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* ocorreu no período com temperaturas mais altas. Acrescenta-se que, quando começou a ocorrer queda na temperatura (próximo do início do inverno), a espécie *Sphaerocavum brasiliense* passou a dominar a biota da Lagoa da Pampulha.

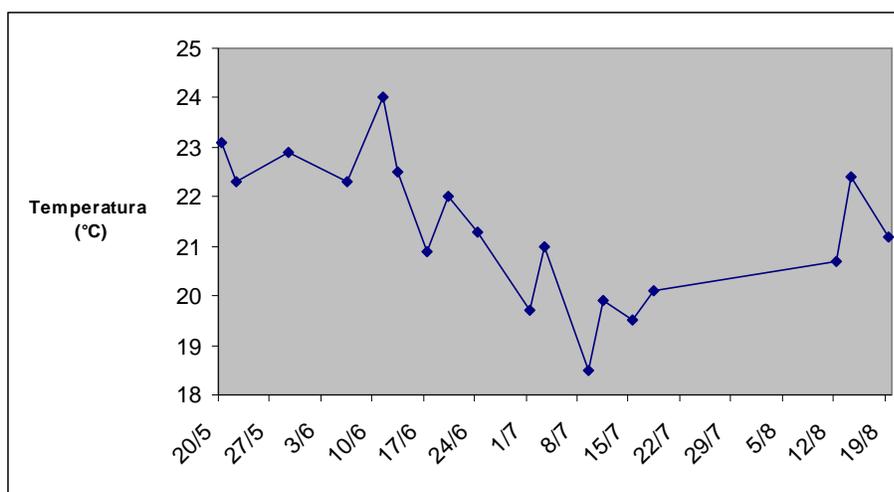


Figura 5-11: Série temporal do parâmetro Temperatura (°C) na Lagoa da Pampulha.

Na Tabela 5-4, apresentam-se os resultados da contagem qualitativa e quantitativa de fitoplâncton obtidos no dia 15 de maio de 2008 referente ao ponto após a pré-filtração.

A maioria das algas, em concentrações bem menores ao serem comparadas com cianobactérias, é removida pelo filtro de areia. No entanto, não ocorreu a remoção total de algas e cianobactérias na unidade de pré-filtração, sendo necessária a etapa de separação em membranas posteriormente.

Tabela 5-4: Resultados da primeira análise quantitativa do fitoplâncton após a pré-filtração (ponto II) realizada em 15/5/2008.

Organismos	Classes	Ponto II: após pré-filtro (Células/mL)	Ponto II: após pré- filtro (Organismos/mL)
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	Ausente	Ausente
<i>Aulacoseira granulata</i>	Bac	Ausente	Ausente
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	108	108
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	Ausente	Ausente
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	54	108
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	Ausente	Ausente
<i>Euglena</i> sp	Eugl	Ausente	Ausente
<i>Fragilaria</i> sp	Bac	269	269
<i>Leponclis</i> sp	Eugl	Ausente	Ausente
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	Ausente	Ausente
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	67742	5377
<i>Pseudoanabaena</i> sp	Cyan	Ausente	Ausente
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	Ausente	Ausente
<i>Scenedesmus ovalternus</i>	Chlo	Ausente	Ausente
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	Ausente	Ausente
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	Ausente	Ausente
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	323	323
Totais		68.496 (6,85 x 10⁴)	6.185

O desempenho do pré-filtro de areia é essencial para o prolongamento da vida útil da membrana. Observou-se que a eficiência da unidade de pré-filtração é excelente, principalmente para remoção de cianobactérias do gênero *Sphaerocavum brasiliense*. No entanto, constatou-se que a pré-filtração não conseguiu boa remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* ao longo de todo monitoramento. Assim a remoção mais significativa deste gênero foi realizada pela unidade de ultrafiltração em membrana.

Os resultados da contagem quantitativa de fitoplâncton referentes ao concentrado e ao descarte (*flush*) estão na Tabela 5-5 e na Tabela 5-6.

Tabela 5-5: Resultado da análise de Fitoplâncton quantitativo no concentrado (ponto IV) realizada em 15/5/2008.

Organismos	Classes	Ponto IV: concentrado (Células/mL)	Ponto IV: concentrado (Organismos/mL)
<i>Closterium sp.</i>	Zygo	54	54
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	108	108
<i>Cryptomonas sp</i>	Cryp	54	54
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	0	0
<i>Fragilaria sp.</i>	Bac	269	269
<i>Monoraphidium cf. contortum</i>	Chlo	54	54
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cyan	111828	13441
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	430	108
<i>Staurastrum leptocladum</i>	Chlo	54	54
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	645	645
Totais		113.496 (1,13 x 10⁵)	14.787

Tabela 5-6: Resultado da análise de Fitoplâncton quantitativo no *flush* (ponto V) realizada em 15 de maio de 2008.

Organismos	Classes	Ponto V: <i>flush</i> (Células/mL)	Ponto V: <i>flush</i> (Organismos/mL)
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	Chlo	215	54
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	108	108
<i>Cryptomonas sp.</i>	Cryp	108	108
<i>Desmodesmus cf. opoliensis</i>	Bac	430	161
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Bac	215	54
<i>Euglena sp..</i>	Eugl	0,00	0,00
<i>Fragilaria sp.</i>	Bac	430	430
<i>Mallomonas sp.</i>	Chry	54	54
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	430	108
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	112903	15591
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	430	108
<i>Selenastrum bibraianus</i>	Chlo	108	108
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	538	538
Totais		115.969 (1,16 x 10⁵)	17.422

Em todas análises referentes ao ponto III, situado na linha do permeado, não foram encontradas algas e cianobactérias durante toda a pesquisa. Exceto nas análises do primeiro dia de coleta (15/5/2008) e do dia 18 de julho, em que foi encontrada uma quantidade insignificante de organismos. Na Tabela 5-7, apresentam-se os dados referentes à primeira análise de fitoplâncton realizada no permeado.

Tabela 5-7: Resultados da análise de Fitoplâncton quantitativo no permeado (ponto III) realizada em 15 de maio de 2008.

Organismos	Classes	Ponto III: Permeado (Células/mL)	Ponto III: Permeado (Organismos/mL)
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cyan	6,17	0,62
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	0,31	0,31
Totais		6,48	0,93

Os organismos quantificados representam um valor insignificante em relação aos dados obtidos na captação e a montante do conjunto-piloto. Em dias de altas concentrações de cianobactérias, houve remoção de até 5 log destes organismos somente pelo sistema de UF.

5.4 Análises bacteriológicas

Foram analisadas as variáveis coliformes totais e *Escherichia coli* de junho a agosto. Quando estas coletas começaram, o conjunto-piloto já tinha 25 horas de operação.

Não foi detectada presença de *Escherichia coli* em nenhuma amostra coletada no permeado.

As análises de coliformes totais estão apresentadas na Tabela 5-8. Foram analisados 100 mL de cada amostra para os pontos I, II e III.

Tabela 5-8: Análises de coliformes totais no período de junho a agosto

Data	Lagoa da Pampulha: NMP (Organismos/ 100 mL)	Após pré-filtração: NMP (Organismos/ 100 mL)	Permeado: NMP (Organismos/ 100 mL)
07 de junho	> 2419,6	_____	31,1
10 de junho	> 2419,6	_____	3,1
15 de junho	> 241960	_____	<1
17 de junho	1670	159	<1
12 de agosto	> 2419,6	> 2419,6	25

Nestas análises, foi detectada a presença de coliformes totais em pequenas concentrações no efluente tratado pela membrana. Este fato pode ser explicado pela grande variabilidade da concentração de coliformes totais na Lagoa da Pampulha. Houve análises em que não foi determinada a quantidade exata destes microrganismos, mesmo fazendo três diluições no afluente.

Outra explicação pode estar relacionada à colmatação da membrana, e a possibilidade de contaminação das amostras que poderia ter ocorrido no translado (Lagoa da Pampulha à Escola de Engenharia). Então, recomenda-se a realização de análises, com maior frequência, para determinar a relação entre a concentração de coliformes totais no permeado e o tempo da carreira de filtração da unidade de ultrafiltração.

No entanto, foram removidos até 5 log destes microrganismos somente pela UF, como pôde ser observado no dia 15 de junho. Acrescenta-se que não foi realizada a etapa de desinfecção do permeado.

5.5 Análises de cianotoxinas

Na Tabela 5-9, são apresentados os resultados da concentração de microcistina ($\mu\text{g L}^{-1}$) para 14 amostras coletadas a partir de 20 de junho referentes aos pontos I e IV (água bruta e concentrado, respectivamente). As coletas terminaram no dia 7 de agosto de 2008.

Tabela 5-9: Análise de microcistina ($\mu\text{g L}^{-1}$) no ponto de captação e no concentrado.

Data	Ponto de captação	Concentrado
20/6/2008	0,91	0,39
24/6/2008	-----	0,20
03/7/2008	0,25	0,31
11/7/2008	0,17	-----
18/7/2008	5,42	0,36
24/7/2008	11,13	0,54
07/8/2008	0,81	1,00

Foram realizadas apenas duas análises para o permeado. Em nenhuma destas amostras foi quantificado valor de microcistina, que poderia ser detectado pelo método ELISA.

A Figura 5-12 refere-se à contagem de cianobactérias no ponto I durante o período mencionado anteriormente. Destacaram-se as espécies *Sphaerocavum brasiliense* e *Cylindrospermopsis raciborskii*.

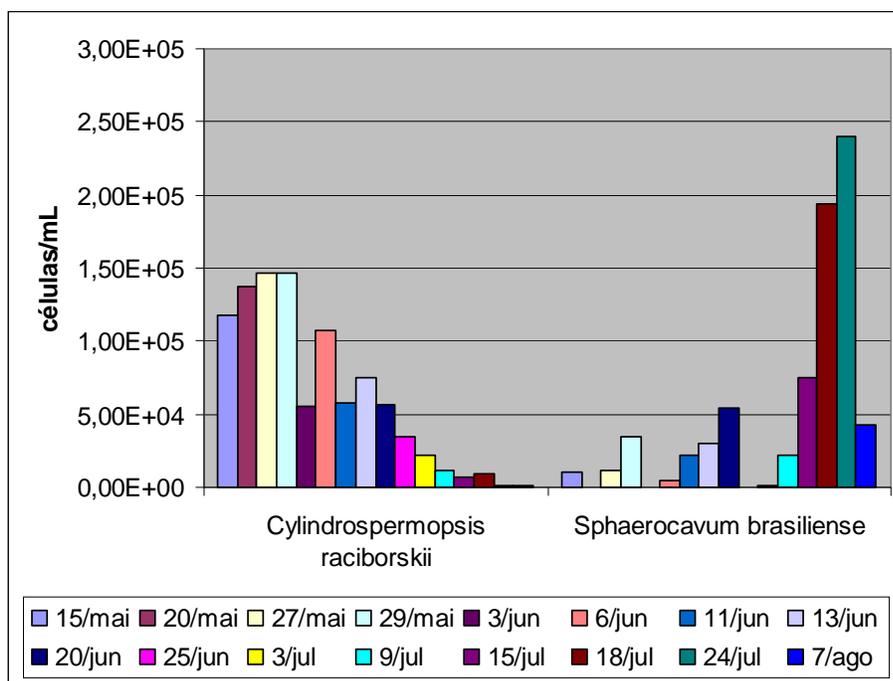


Figura 5-12: Contagem de cianobactérias no ponto de captação da água bruta.

Analisando a contagem qualitativa e quantitativa de cianobactérias, conclui-se que a microcistina detectada nas análises do ponto de captação nesta época foi proveniente do gênero *Sphaerocavum brasiliense*.

As microcistinas são endotoxinas que são liberadas para a água, quando as células de cianobactérias morrem e entram em senescência. Neste período, não foram encontradas cianobactérias no permeado e nem microcistina de acordo com o método ELISA. Considerando este fato e a probabilidade de grande parte da concentração de microcistinas ainda não ter sido liberada por lise celular a montante do conjunto-piloto, nota-se a grande capacidade da membrana de ultrafiltração na remoção de grande parte das microcistinas.

Para detectar a presença de saxitoxinas, que são exotoxinas, produzidas pela espécie *Cylindrospermopsis raciborskii*, foram realizadas amostras de cromatografia líquida na água bruta e no permeado. Na Tabela 5-10, encontram-se os resultados qualitativos de quatro amostras de saxitoxinas. As coletas foram realizadas em um período de ocorrência de floração desta espécie. Todas as amostras qualitativas acusaram presença de saxitoxinas.

Tabela 5-10: Análises qualitativas de saxitoxinas produzidas por *C. raciborskii*

Data	Ponto de coleta	Presença de saxitoxinas
20/06/2008	Lagoa da Pampulha	Sim
24/06/08	Lagoa da Pampulha	Sim
11/06/2008	Lagoa da Pampulha	Sim
27/07/2008	Permeado	Sim

A quantificação das amostras de saxitoxinas não foi possível devido aos problemas operacionais no aparelho de HPLC do laboratório de ficologia do ICB-UFMG. No entanto, foi possível constatar que a membrana de UF não remove saxitoxinas. Estas toxinas alcalóides possuem peso molecular abaixo de 1000 g mol^{-1} , enquanto a membrana UF, usada na pesquisa, tem $10.000 \text{ g mol}^{-1}$. Recomenda-se a avaliação da eficiência de rejeição das membranas NF e OR, cujo peso molecular de corte está abaixo de 1.000 g mol^{-1} .

Assim pôde-se, com segurança, concluir que a membrana de ultrafiltração removeu eficientemente células de algas e cianobactérias, sem lise celular, produzindo água potável dentro dos restritos padrões de qualidade nas condições operacionais descritas anteriormente.

5.6 Análise Estatística

Na Tabela 5-11, encontra-se a análise descritiva dos resultados das análises para turbidez, alcalinidade e dureza total referentes à água bruta da Lagoa da Pampulha (I) e ao permeado (III).

Tabela 5-11: Análise descritiva dos parâmetros turbidez, alcalinidade e dureza referentes ao ponto de captação e ao permeado.

Parâmetro	Ponto monitorado	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão
Turbidez	I	9,0	77,0	31,9	28,1	17,6
Turbidez	II	0,10	0,40	0,20	0,20	0,08
Alcalinidade	I	96,0	128,0	112,84	112,0	9,5
Alcalinidade	III	93,0	113,0	104,8	104,0	5,1
Dureza	I	87,0	111,0	101,4	112,0	6,96
Dureza	III	89,0	103,0	96,7	96,0	4,2

Na Figura 5-13, mostra-se o gráfico Box-wisker para o parâmetro Turbidez na Lagoa da Pampulha e no permeado durante os quatro meses de pesquisa.

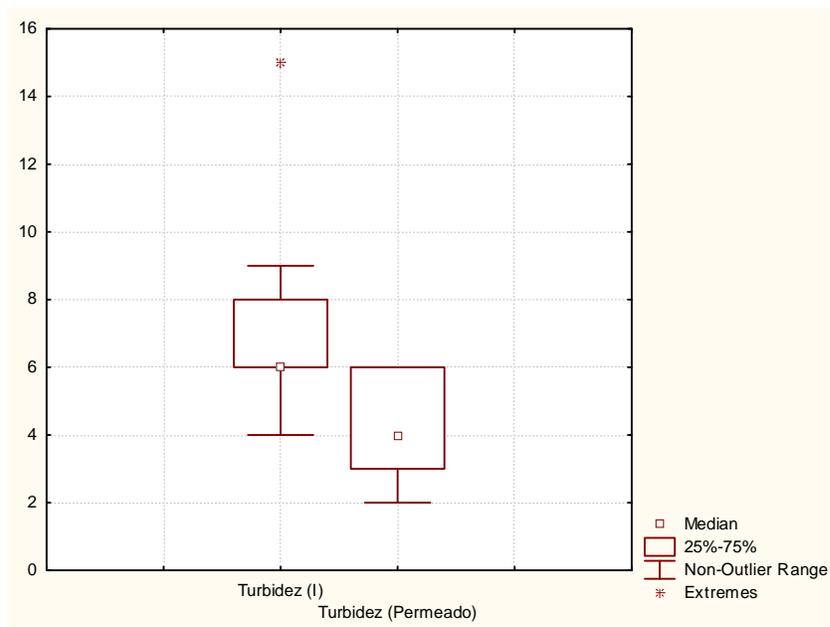


Figura 5-13: Gráfico Box-wisker para o parâmetro Turbidez na Lagoa da Pampulha.

A turbidez da água na Lagoa da Pampulha variou muito no período de realização da coleta, no entanto, os dados referentes à turbidez no permeado não sofreram mudanças bruscas. Este fato reforça que, após a escolha do tipo de membrana baseada na água bruta do manancial, a tecnologia de separação por meio de membranas não é afetada bruscamente pelas mudanças do parâmetro turbidez.

Pôde-se notar que, 50 % dos valores obtidos durante o monitoramento, apresentaram turbidez menor que 0,20 uT no permeado. Este valor foi excelente, pois a Portaria 518 faz uma recomendação enfática de se buscar turbidez menor que 0,50 uT como meta para garantia da qualidade microbiológica da água tratada. Este resultado está abaixo do padrão norte-americano (0,3 uT). Ressalta-se que a meta da EPA é o valor de 0,1 uT para água filtrada com o objetivo de otimizar a remoção de protozoários.

Na Tabela 5-12, são apresentados os dados de estatística descritiva básica para os parâmetros cor aparente e cor verdadeira no ponto de captação (ponto I) e no permeado (ponto III).

Tabela 5-12: Estatística descritiva para os parâmetros cor Aparente e cor Verdadeira

Parâmetro	Ponto	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão
Cor Aparente	I	46,0	156,0	93,7	86,0	31,5
Cor Aparente	III	3,0	8,0	4,4	3,0	1,4
Cor Verdadeira	I	4,0	28,0	7,9	6,0	5,4
Cor Verdadeira	III	2,0	6,0	3,8	4,0	1,1

Observa-se que, a variabilidade dos dados de cor verdadeira e cor aparente no permeado é muito pequena, mostrando a regularidade do processo de ultrafiltração.

A análise descritiva das principais espécies de cianobactérias, encontradas na Lagoa da Pampulha e após o filtro de areia no período de maio a agosto de 2008, está na Tabela 5-13.

Tabela 5-13: Estatística descritiva para as principais espécies de cianobactérias na Lagoa da Pampulha.

Medidas	<i>C. raciborskii</i> no ponto de captação (células/mL)	<i>C. raciborskii</i> após pré-filtro (células/ mL)	<i>Sph. brasiliense</i> no ponto de captação (células/mL)	<i>Sph. Brasiliense</i> após pré-filtro (células/mL)
Mínimo	710	710	0	0
Máximo	147.000	130.107	239.516	20.072
Média geométrica	29.300	21.600	4.160	1.720
Mediana	56.989,3	33.871	21.505	2688
Desvio padrão	54782,4	43.638	71.779	6.279

A eficiência de remoção de células da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* ao longo do fluxo da unidade-piloto, desde a captação da água bruta até a passagem pelo pré-filtro de areia, é apresentada na Tabela 5-14.

Tabela 5-14: Eficiência de remoção de células de *Cylindrospermopsis raciborskii* após a pré-filtração.

Data	<i>C. raciborskii</i> no ponto de captação (células / mL)	<i>C. raciborskii</i> após pré-filtração (células/mL)	Eficiência de remoção do filtro de areia (%)
15/5	117.000	67.700	42
20/5	138.000	109.000	21
27/5	147.000	130.000	11
29/5	147.000	70.400	52
03/6	55.400	55.400	0
06/6	107.000	107.000	0
11/6	57.500	43.000	25
13/6	74.700	33.900	55
20/6	57.000	10.800	81
25/6	34.400	11.600	66
09/7	11.800	8.060	3,1
18/7	9.140	6.990	24
24/7	710	1999	-33
07/8	1075	1474	-37

A eficiência de remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* pelo filtro de areia é baixa, quase desprezível. Esta espécie de cianobactérias é removida exclusivamente pelo processo de ultrafiltração.

Provavelmente os valores negativos encontrados na tabela acima ocorreram devido à saturação do meio filtrante do pré-filtro, pois houve períodos em que a retro lavagem deste filtro foi realizada após três semanas.

Na Tabela 5-15, apresentam-se os dados referentes à remoção da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* em unidades logarítmicas (log). Pôde-se observar que, a membrana UF quando solicitada, foi capaz de remover mais de 5 logs desta cianobactéria.

Tabela 5-15: Eficiência de remoção de células de *C. raciborskii* pela membrana de UF

Data	<i>C. raciborskii</i> anteriormente à membrana UF (cel/ mL)	Eficiência de remoção de células <i>C. Raciborskii</i> da UF (log)
15/5	67.700	4
20/5	109.00	5
27/5	130.000	5
29/5	70.400	4
03/6	55.400	4
06/6	107.000	5
11/6	43.000	4
13/6	33.900	4
20/6	10.800	4
25/6	11.600	4
09/7	8.060	3
18/7	6.990	3
24/7	1.990	3
07/8	1.474	3

Assim a membrana de ultrafiltração rejeitou todas as células de cianobactérias da espécie filamentosa *Cylindrospermopsis raciborskii*.

Os dados referentes à eficiência de remoção da espécie *Sphaerocavum brasiliense* por meio da pré-filtração são apresentados na Tabela 5-16.

Tabela 5-16: Eficiência de remoção da espécie *Sphaerocavum brasiliense* após pré-filtração.

Data	<i>Sphaerocavum. brasiliense</i> no ponto de captação (células / mL)	<i>Sphaerocavum. brasiliense</i> após pré-filtração (células/mL)	Eficiência de remoção do pré-filtro de areia (%)
15/5	10.800	0	100
27/5	11.300	0	100
29/5	34.400	4300	87,5
03/6	4.300	4300	0
06/6	29.600	16.100	45,5
11/6	53.800	0	100
13/6	21.500	10.800	49,8
15/7	75.300	2.690	96,4
18/7	194.000	2688	86,1
24/7	24.000	1990	82,9

A eficiência do filtro de areia na remoção da espécie *Sphaerocavum brasiliense* variou bastante durante o período de operação. No entanto, na maioria das análises realizadas, o filtro de areia conseguiu remoção acima de 80% desta espécie. Assim a pré-filtração exerceu um papel muito importante na proteção da membrana, ajudando a aumentar o tempo de carreira do sistema de ultrafiltração e prolongar a vida útil da membrana. Acrescenta-se que, a percentagem de cianobactérias *Sphaerocavum. brasiliense* que não foi removida pelo filtro de areia, foi rejeitada completamente pela membrana UF.

Na Tabela 5-17, apresenta-se o quadro-resumo da eficiência de remoção da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* ao longo de todo conjunto-piloto de ultrafiltração. Sendo concluído que a membrana de ultrafiltração desempenhou papel importante na remoção desta espécie de cianobactéria, enquanto o pré-filtro de areia foi irregular e ineficiente para esta função.

Tabela 5-17: Quadro-resumo de eficiência de remoção da espécie *C. raciborskii* no conjunto-piloto de ultrafiltração

Data	Células de <i>C. raciborskii</i> no ponto de captação	Células de <i>C. raciborskii</i> após pré-filtração	Eficiência de remoção do prefiltro (%)	Eficiência de remoção da unidade de UF (log)
15/5	$1,17 \times 10^5$	$6,77 \times 10^4$	42	4
20/5	$1,38 \times 10^5$	$1,09 \times 10^5$	21	5
27/5	$1,47 \times 10^5$	$1,30 \times 10^5$	11	5
29/5	$1,47 \times 10^5$	$7,04 \times 10^4$	52	4
03/6	$5,54 \times 10^4$	$5,54 \times 10^4$	0	4
06/6	$1,07 \times 10^5$	$1,07 \times 10^5$	0	5
11/6	$5,75 \times 10^4$	$4,30 \times 10^4$	25	4
13/6	$7,47 \times 10^4$	$3,39 \times 10^4$	55	4
20/6	$5,70 \times 10^4$	$1,08 \times 10^4$	81	4
25/6	$3,44 \times 10^4$	$1,16 \times 10^4$	66	4
09/7	$1,18 \times 10^4$	$8,06 \times 10^4$	32	5

Enfim, ao projetar um sistema com a tecnologia de membranas, deve-se avaliar a necessidade de uma unidade de pré-filtração e determinar as características deste pré-filtro. Ressalta-se que, para algumas circunstâncias, a unidade de pré-filtração pode ser composta por outra membrana com diâmetros de poros maiores. Este fluxograma com dois tipos de membranas é denominado sistema dual.

6 CONCLUSÕES

Após a realização do monitoramento da qualidade de água antes e após o tratamento com o emprego da tecnologia de ultrafiltração em membrana, pode-se concluir que:

- Os principais gêneros de cianobactérias encontrados na orla da Lagoa da Pampulha durante o período de monitoramento, no ponto situado no Iate Tênis Clube, foram *Cylindrospermopsis raciborskii* e *Sphaerocavum brasiliense*. Foram encontrados valores na ordem de grandeza de 10^3 a 10^5 células mL^{-1} .
- O permeado produzido pela unidade-piloto de ultrafiltração atendeu ao padrão de potabilidade da legislação brasileira para os seguintes parâmetros analisados: turbidez, cor aparente e *Escherichia coli*.
- O sistema de ultrafiltração produziu permeado com turbidez abaixo de 0,45 uT durante todo processo monitorado. No início da carreira de filtração, durante as primeiras 25 h, o efluente tratado apresentou valores de turbidez por volta de 0,15 uT.
- A membrana de ultrafiltração, operada sob pressão de 138 kPa, não remove alcalinidade e dureza total, pois a sua faixa de tamanho dos poros médios não rejeita grande parte dos compostos orgânicos dissolvidos e íons bivalentes. Para remoção total destes compostos, recomenda-se o uso de nanofiltração ou osmose reversa.
- A membrana de ultrafiltração, fabricada de polietersulfona, removeu completamente células de algas e cianobactérias durante 80 horas de monitoramento da unidade-piloto, no período de abril a agosto. Acrescenta-se que houve uma etapa de pré-filtração em filtro de areia tipo piscina para auxílio do sistema e prolongamento da vida útil da membrana.
- A membrana de ultrafiltração removeu microcistinas (endotoxinas), para um intervalo de pressão de 138 kPa (20 PSI) a 276 kPa (40 PSI). Acrescenta-se, que nesta faixa de pressão não houve lise celular, pois, não foi detectada microcistina no permeado pelo método ELISA.

- A membrana de UF, cujo peso molecular de corte é $10.000 \text{ g mol}^{-1}$, não removeu saxitoxinas, pois o peso molecular de corte desta toxina alcalóide é menor que 1000 g mol^{-1} . Esta conclusão foi baseada nas análises qualitativas de cromatografia líquida (HPLC).

7 RECOMENDAÇÕES

Estas são as recomendações para futuros trabalhos com a tecnologia de separação em membranas:

- Avaliar a eficiência da recirculação do concentrado no sistema de membrana estudado.
- Determinar as características físico-químicas e biológicas do concentrado produzido para estabelecer o gerenciamento da disposição final deste efluente.
- Avaliar a remoção de coliformes totais durante toda carreira de filtração para estabelecer se há alguma relação deste parâmetro com a colmatção da membrana.
- Realizar maior número de análises de quantificação da concentração de cianotoxinas (ELISA e HPLC) na água bruta e no permeado, para avaliação mais precisa da lise celular das cianobactérias no fluxograma da unidade-piloto, conseqüentemente, a necessidade de pós-tratamento do efluente tratado.
- Estudar o emprego de outros módulos de filtração (MF, NF e OR) no conjunto-piloto, avaliando o rendimento do sistema com estas novas membranas.
- Mudar o fluxograma do projeto para avaliação de outros sistemas como integrado e dual. No sistema integrado, a tecnologia de membrana é associada ao tratamento convencional. No sistema dual, as membranas de módulos diferentes trabalham em série, participando da pré-filtração, filtração e, às vezes, do pós-tratamento quando solicitado.
- Avaliar o desempenho da tecnologia de membranas na remoção de cianotoxinas com adição de carvão ativado em pó a montante do conjunto-piloto.
- Avaliar a tecnologia de membranas para remoção de outros parâmetros de qualidade estabelecidos pela Portaria 518, tais como: trihalometanos – quando do emprego da pré-desinfecção -, metais pesados e agrotóxicos.
- Avaliar o desempenho das membranas de NF e OR na remoção de cianotoxinas.

- Estabelecer regulamentação específica para o emprego da tecnologia de membranas no Brasil fundamentada nos resultados de pesquisas realizadas no País.
- Realização de mais pesquisas científicas para o desenvolvimento de um processo de produção de membranas com tecnologia brasileira visando à redução do custo da aplicação em escala real.
- Realização de reuniões entre os especialistas da tecnologia de separação em membranas do Brasil com o objetivo de consolidar o uso de termos técnicos originados do idioma inglês e ajudar na redação de trabalhos científicos em todo território nacional.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st edition. Washington DC, 2005.
- APTEL, P.; BUCKLEY, C. A. - Categories of membrane operation. In: *Water Treatment Membrane Processes*. p. 2.1 - 2.24. MacGraw Hill, New York, 1996.
- ARNAL, J. M. Selection of the most suitable ultrafiltration membrane for water disinfection in developing countries. *Desalination* 168. p. 265-270, 2004.
- AWWA: American Water Works Association. Disponível em: www.awwa.org.
- AZEVEDO, S. M. F. O. - Toxinas de cianobactérias: causas e conseqüências para a Saúde Pública. *Medicina On Line*, v. 1, Ano 1, n. 3. Jul./Ago./Set. 1998.
- BARBOSA, E. *Floração de cianobactérias na Lagoa da Pampulha*. 2006.fotografia.
- BRYANT, D. A. *The Molecular Biology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994, 879p.
- CALIJURI, M. C.; ALVES, M. S. A.; DOS SANTOS, A. C. A. *Cianobactérias e Cianotoxinas em Águas Continentais*. São Carlos: Rima Editora, 2006. 118 p.
- CARMICHAEL, W. W. - Blue-Green Algae: An Overlooked Health Threat. In: *Heath & Environment Digest*. Freshwater Foundation. July, 1991. v. 5, n.6, p. 1-4, 1991.
- CASTENHOLZ, R. W.; WATERBURY, J. B. In: J.T. Staley, M.P. Bryant, N. Pfenning and J.G. Holt [Eds] *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Williams & Wilkins, Baltimore, 1989, v. 3, p. 1710-1727.
- CEBALLOS, B. S. O.; AZEVEDO, S. M. F. O.; BENDATE, M. M. A. Fundamentos Biológicos e Ecológicos Relacionados às Cianobactérias. In: PÁDUA, V. L. (coord.) *Contribuição ao Estudo da Remoção de Cianobactérias e Microcontaminantes Orgânicos por meio de Técnicas de Tratamento de Água para Consumo Humano*. Rio de Janeiro. ABES, 2006, p.23-81.
- CHELLAM, S.; JACANGELO, J. G. Fouling of Microfilters in Direct Flow: Comparison of Constant Flux and Constant Pressure Operation. In: *AWWA Annual Conference and Exposition*, Dallas, Tex., USA, 1998.
- CHERYAN, M. *Ultrafiltration Handbook*. Lancaster, USA: Technomic Publishing Company, 1986. 375 p.
- CHORUS, I.; BARTRAM, J. *Toxic Cyanobacteria in Water. A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. 1ª edição, WHO, E & FN Spon, London, 1999. 416p.

CÔTÉ, P.; SIMON, R.; MOURATO, D. New developments in immersed membranes. In: AWWA MEMBRANE TECHNOLOGY CONF. PROC., San Antonio, 12 p, 2001.

COUTINHO, W.; CHAMPS, J. R.; MACIEL JR, P.; LIMA, C. C. Z.; VALADARES, M. G. Programa de Recuperação e Desenvolvimento Ambiental da Bacia da Pampulha. In: IV DIÁLOGO INTERAMERICANO DE GERENCIAMENTO DE ÁGUAS, 2001, Foz do Iguaçu. Anais. SRH-MMA, 2001.

DOUGLAS, S. E. Chloroplast origins and evolution. In: D. A. Bryant [Ed.] *The Molecular Biology of Cyanobacteria.*; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. P. 91-118, 1994.

EDZWALD, J. K. Algae, Bubbles, Coagulants and Dissolved Air Flotation. *Water Science & Technology*, v. 27, n. 10, p. 67-81, 1993.

ELARDE, J.R.; BERGMAN, R.A.- The cost of membrane filtration for municipal water supplies. In: AWWA MEMBRANE TECHNOLOGY CONF. PROC.; San Antonio, 8p, 2001.

FALCONER, I. R.; RUNNEGAR, M. T. C.; BUCKLEY, T.; HUYN, V. L.; BRADSHAW, P. Using activated carbon to remove toxicity from drinking water containing cyanobacterial blooms. *Journal of the American Water Works Association*, v. 81, n. 2, p. 102-105, 1989.

FALCONER, I.R. Health implications of Cyanobacterial (blue-green algae) toxins. In: STEFFENSEN, D.A.; NICHOLSON, B. C.; editors. Toxic Cyanobacteria Current Status of Research and Management – Proceedings of an International Workshop. Adelaide, 1994.

GOOGLE EARTH. Microsoft Windows XP. 2008. Disponível em:www.google.com

HART, J.; FAWELL, J. K.; CROLL, B. The fate of both intra- and extracellular toxin during drinking water treatment. *Water Supply*, 1998.

HILLEBRAND, H.; DÜRSELEN, C. D.; KIRSCHTEL, D.; POLLINGER, U.; ZOHARY, T. Biovolume calculations for pelagic and benthic microalgae. *J. Phycol.*, v. 35, p. 403-424, 1999.

HIMBERG, K.; KEIJOLA, A. M.; HIISVIRTA, L.; PYYSALO, H.; SIVONEN, K. The effect of water treatment process on the removal of hepatotoxins from *Microcystis* and *Oscillatoria* cyanobacteria: A laboratory study. *Water Research*, v. 23, n. 8, p. 974-984, 1989.

HAWSER, S. P.; CODD, G. A.; CAPONE, D. G.; CARPENTER, R. J. A neurotoxic factor associated with the bloom-forming cyanobacterium *Trichodesmium*. *Toxicon* 29: p. 277-278, 1991.

JACANGELO, J. G; TRUSSEL, R. R.; WATSON, M. Role of membrane technology in drinking water treatment in the United States. *Desalination* 113: p. 119-127, 1997.

KAEBERNICK, M. & NEILAN, B.A. Ecological and molecular investigations of cyanotoxin production – Mini Review. *FEMS Microbiology Ecology*, 35 : 1-9, 2001.

KARNER, D. A.; STANDRIDGE, J. H.; HARRINGTON; G. W.; BARNUM, R. P. Microcystin algal toxins in source and finished drinking water. *Journal AWWA*, v. 93, n.8, p. 72-81, 2001. Disponível em: www.awwa.org/awwa/library.

LIBANIO, M. Comunicação pessoal, 2007.

KUIPER-GOODMAN, T.; FALCONER, I.; FITZGERALD, J. Human health aspects. In: *Toxic Cyanobacteria in Water. A Guide to Their Public Health. Consequences, Monitoring and Management* (CHORUS, I. & BARTRAM, J. Eds.). E& FN Spon, London, p. 114-153, 1999.

METZ, A. V. *Iate Tênis Clube*. 2008. Fotografia. Disponível em: www.google.com.

MIERZWA, J. C. Processo de separação por membranas para tratamento de água. In: PADUA, V. L. (coordenador). *Contribuição ao Estudo da Remoção de Cianobactérias e Microcontaminantes Orgânicos por Meio de Técnicas de Tratamento de Água para Consumo Humano*. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 335-380.

MIERZWA, J.C.; SILVA, M. C. C. DA; RODRIGUES, L. D. B; HESPANOL, I. Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. *Engenharia Sanitária e Ambiental* v. 13, p. 78-87; 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE DO BRASIL. Programa Água Doce, 2004. Disponível em: www.mma.gov.br/srhu.

NAKATSUKA, S.; NAKATE, I.; MYIANO, T. Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow membranes. *Desalination* 106: p. 55-61, 1996.

NICHOLSON, B.C; ROSITANO, J.; BUCH, M.D. Destruction of cyanobacterial peptide hepatotoxins by chlorine and chloramine. *Water Research*, v.28, n.8, 1994.

PAERL, H.W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters. *Limnol. Oceanogr.*, v.33, p. 823-847, 1988.

PIANTA, R. et al. Micro and ultrafiltration of karstic Spring water. *Desalination* 117: p.61-71, 1998.

RIDGWAY, H. F.; KELLY, A.; JUSTICE, C., OLSON, B. H. Microbial fouling of reverse osmosis membranes used in advanced wastewater treatment technology: chemical, bacteriological and ultrastructural analyses. *Appl. Env. Microbiol.*, v. 45, p. 1066-1084, 1983.

ROSET, J.; AGUAYO, S.; MUÑOZ, M.J. Detección de cianobacterias y toxinas. Una revisión. *Rev. Toxicología*, v. 18, p. 65-71, 2001.

SANT'ANA, C. L.; AZEVEDO, M.T.P.; AGUJARO, L. F.; CARVALHO, M.D.C.; CARVALHO, L.R.D; SOUZA, R. C.R.D. Manual Ilustrado para Identificação e Contagem de Cianobacterias Planctônicas de Águas Continentais Brasileiras. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda; São Paulo: Sociedade Brasileira de Ficologia, 2006. 58 p.

SANTIAGO, L. M. *Remoção de Células de Cianobacterias por Processos de Sedimentação e Flotação por Ar Dissolvido : Avaliação em Escala de Bancada*. 2008. 183 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SCHENEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso*. 1º edição. São Paulo: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária Ambiental. 2001. 324 p.

SEITZ, P.; SORGINE, L. Maintaining and Extending Membrane Life. *Journal AWWA*, opflow, v. 33, n. 10, p. 14-16, 2007.

SENS, M. L; DALSSASSO, R. L., MELO FILHO, L. C. ; MONDARDO, R. I. Filtração em Margem.In: PÁDUA, V. L. (coordenador). *Contribuição ao Estudo da Remoção de Cianobacterias e Microcontaminantes Orgânicos por Meio de Técnicas de Tratamento de Água para Consumo Humano*. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 173-236.

SHORNEY-DARBY, H. ; ABRAHAM, K. ; DIAS, G. ; HENDERSON, R. ; HIDAHL, C. ; RYAN, P. Expanding a Conventional Water Treatment Plant With Low-pressure Membranes. *Journal AWWA*, v. 99, n. 12, p. 52-60, 2007.

SIVONEM, K.; JONES, G. Cyanobacterial toxins. In: *Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health. Consequences, monitoring and management*. (CHORUS, I & BARTRAM, J. EDS.). E & FN Spon, Londres, p. 41-91, 1999.

STATES, S. ; BUZZA, E. ; CASSON, L. ; EVANS, R. ; GIGLIOTTI, T. ; MOVAHED, B. ; SCHEURING, M. Membrane filtration as posttreatment. *Journal AWWA*, v. 92, n. 8, p. 59-68, 2000.

TANIGUCHI, Y. An overview of pretreatment technology for reverse osmosis desalination plants in Japan. *Desalination*, p. 21-36, 1997.

TRABULSY, L. R; ALTERTHUM, F.; CANDEIAS, J. A. N; GOMPERTZ, O. F. *Microbiologia*. 3º edição. São Paulo. Editora Atheneu. 1999.

TUPINAMBÁS, G.; RIBEIRO, L. Minas em alerta contra algas azuis. *Estado de Minas*, Belo Horizonte, 12 out. 2007. Disponível em: www.uai.com.br.

VIANA, M. *Avaliação de Técnicas de Tratamento na Remoção de Saxitoxinas em Águas de Consumo Humano*. 2006. 111 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

VLASKI, A.; van BREEMAN, N. A.; ALAERTS, G. J. Optimization of Coagulation Conditions for the Removal of Cyanobacteria by Dissolved air Flotation or Sedimentation. *Journal Water SRT-Aqua*, v. 45, n. 5, p. 253-261, 1996.

WALSBY, A. E. *Mechanisms of buoyancy regulation by planktonic cyanobacteria of gas vesicles*. In: P. Fay and C. Van Baalen [Eds] *The Cyanobacteria*. Elsevier, Amsterdam, p. 377- 414, 1987.

WHITTON, B. A. Diversity, ecology and taxonomy of the cyanobacteria. In: N.H. Mann and N. G. Carr [Eds] *Photosynthetic Prokaryotes*. Plenum Press, New York, p. 1- 51, 1992.

YOO, R. S.; CARMICHAEL, W. W.; HOEHN, R.C; HRUDEY, S. E. *Cyanobacterial (Blue-Green Algal) Toxins: A Resource Guide*. American Water Works Association – Research Foundation, U.S.A., 1995. 229p.

ZAGATTO, P. A.; ARAGÃO, M. A. *Manual de orientação em casos de florações de algas tóxicas: um problema ambiental e de saúde pública*. São Paulo. Série Manuais, 14 – CETESB, 1997. 20p.

ZAGATTO, P. A. Toxinas de algas: Riscos à Saúde Pública. *Revista Gerenciamento Ambiental*, v. 3, n. 17. São Paulo. 4p. Nov./Dez. 2001.

9 ANEXO: ANÁLISES DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

Análises qualitativas e quantitativas da comunidade fitoplanctônica da Lagoa da Pampulha realizada no período de maio a agosto de 2008.

As análises foram realizadas pela bióloga Bárbara F. de Melo Jardim (CRB 49845/04 -P).

ANÁLISE HIDROBIOLÓGICA

Amostras: ITC Pampulha
Data da Coleta: 20/05/08

Fitoplâncton qualitativo e quantitativo

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto I: água bruta Células/mL	Ponto I: água bruta Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	430,11	53,76
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	Chlo	+	322,58	53,76
<i>Aulacoseira granulata</i>	Bac	+	215,05	53,76
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Chlo	+	53,76	53,76
<i>Cosmarium moniliferum</i>	Zygo	+	0,00	0,00
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+++	215,05	215,05
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	+	161,29	161,29
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	2580,65	107,53
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	161,29	161,29
<i>Lepocinclis</i> sp.	Eugl	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Monoraphidium contortum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Monoraphidium griffithii</i>	Chlo	+	53,76	53,76
<i>Nitzschia</i> cf. <i>palea</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Nitzschia</i> sp.	Bac	+	0,00	0,00
<i>C.raciborskii</i>	Cyan	++++	137634,41	11720,43
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>ovalternus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	++	0,00	0,00
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	322,58	322,58
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			142.150,54	12.956,99

Legenda para o exame qualitativo

-	Organismo Ausente
+	Organismo encontrado em 10 % dos campos analisados;
++	Organismo encontrado em 25 % dos campos analisados;
+++	Organismo encontrado em 50 % dos campos analisados;
++++	Organismo encontrado em 75 % dos campos analisados;
+++++	Organismo encontrado em 100 % dos campos analisados.

Bac.: Bacillariophyceae; Chlo.: Chlorophyceae; Cyan.: Cyanophyceae; Cryp.: Cryptophyceae; Zygo.: Zygothricaceae; Din.: Dinophyceae; Chry.: Chrysophyceae; Eugl.: Euglenophyceae.

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto II: após filtro de areia (células/mL)	Ponto II: após filtro de areia (Organismos/mL)
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	645,16	107,53
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Chlo	+	53,76	53,76
<i>Closteriopsis</i> sp.	Zygo	+	53,76	53,76
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+++	161,29	161,29
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	+	0,00	0,00
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	+	215,05	53,76
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	215,05	53,76
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	161,29	161,29
<i>Mallomonas</i> sp.	Chry	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	1075,27	53,76
<i>Monoraphidium contortum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Monoraphidium griffithii</i>	Chlo	+	107,53	107,53
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	108602,15	10268,82
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	430,11	107,53
<i>Scenedesmus ovalternus</i>	Chlo	+	430,11	53,76
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	215,05	53,76
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+++	3763,44	107,53
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	215,05	215,05
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			116.344,09	11.612,90

Obs.: No ponto três (Permeado) não foi detectada a presença de nenhum organismo.

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto IV: Concentrado Células/mL	Ponto IV: Concentrado Organismos/mL
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Chlo	+	107,53	107,53
<i>Closteriopsis</i> sp.	Zygo	+	53,76	53,76
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	++	322,58	322,58
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	+	430,11	430,11
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	++	0,00	0,00
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	++	215,05	53,76
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	++	645,16	645,16
<i>Mallomonas</i> sp.	Chry	+	53,76	53,76
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	860,22	107,53
<i>Monoraphidium contortum</i>	Chlo	+	107,53	107,53
<i>Monoraphidium griffithii</i>	Chlo	+	107,53	107,53
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	107526,88	10752,69
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	860,22	215,05
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>ovalternus</i>	Chlo	+	430,11	53,76
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	645,16	645,16
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			112.365,59	13.655,91

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto V: Flush Células/mL	Ponto V: Flush Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	0,00	0,00
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Closteriopsis</i> sp.	Zygo	+	107,53	107,53
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+++	322,58	322,58
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	+	215,05	215,05
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	+	215,05	53,76
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	++	215,05	53,76
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	860,22	860,22
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	860,22	53,76
<i>Monoraphidium griffithii</i>	Chlo	+	107,53	107,53
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	123655,91	24193,55
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>ovalternus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+++	1612,90	53,76
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	537,63	537,63
Totais			128.709,68	26559,14

ANÁLISE HIDROBIOLÓGICA

Amostras: ITC Pampulha Data da Coleta: 03/06/08
--

Fitoplâncton qualitativo e quantitativo

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto I: água bruta Células/mL	Ponto I: água bruta Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	322,58	53,76
<i>Aulacoseira granulata</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Closteriopsis</i> sp.	Zygo	+	53,76	53,76
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+	161,29	161,29
<i>Cryptomonas</i> sp	Cryp	+	53,76	53,76
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	1075,27	107,53
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	161,29	161,29
<i>Mallomonas</i> sp.	Chry	+	53,76	53,76
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	++	860,22	53,76
<i>Cylindrospermopsi raciborskii</i>	Cyan	+++++	55376,34	5268,82
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>ovalternus</i>	Chlo	+	1720,43	215,05
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	53,76	53,76
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	161,29	161,29
TOTAIS (Células/mL) / (Organismos/mL)			60.053,76	6.397,85

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto II: após filtro de areia Células /mL	Ponto II: após filtro de areia Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	0,00	0,00
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+	107,53	107,53
<i>Cryptomonas sp.</i>	Cryp	+	0,00	0,00
<i>Desmodesmus cf. Opoliensis</i>	Chlo	+	322,58	107,53
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Fragilaria sp.</i>	Bac	+	107,53	107,53
<i>Mallomonas sp.</i>	Chry	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Monoraphidium griffithii</i>	Chlo	+	53,76	53,76
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	60215,05	4623,66
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+	1075,27	53,76
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	322,58	322,58
TOTAIS			62.204,30	5.376,34

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto IV: Concentrado Células/mL	Ponto IV: Concentrado Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+	107,53	107,53
<i>Cryptomonas sp.</i>	Cryp	+	107,53	107,53
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Fragilaria sp.</i>	Bac	+	53,76	53,76
<i>Mallomonas sp.</i>	Chry	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Monoraphidium griffithii</i>	Chlo	+	53,76	53,76
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	74193,55	6881,72
<i>Selenastrum bibrainum</i>	Chlo	+	53,76	53,76
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	645,16	645,16
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			75.215,05	7.903,23

ANÁLISE HIDROBIOLÓGICA

Amostras: ITC Pampulha Data da Coleta: 18/07/08
--

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto I: água bruta Células/mL	Ponto I: água bruta Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	430,11	53,76
<i>Amphora ovalis</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Aulacoseira granulata</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Closteriopsis</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum cambricum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum microporum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum reticulatum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	++	0,00	0,00
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	++	0,00	0,00
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	9139,78	430,11
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	0,00	0,00
<i>Mallomonas</i> sp.	Chry	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Micractinium</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Phacus tortus</i>	Eugl	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>ovalternus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+++++	193548,39	322,58
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	215,05	215,05
TOTAIS			203333,33	1021,51

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto II: após filtro de areia (Células/mL)	Ponto II: após filtro de areia (Organismos/mL)
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	860,22	107,53
<i>Amphora ovalis</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Aulacoseira granulata</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Closteriopsis</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum cambricum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum microporum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum reticulatum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	++	53,76	53,76
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	++	53,76	53,76
<i>C. raciborskii</i>	Cyan	+++++	9139,78	322,58
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>opoliensis</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	215,05	53,76
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	0,00	0,00
<i>Mallomonas</i> sp.	Chry	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Micractinium</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Phacus tortus</i>	Eugl	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>ovalternus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+++++	2688,17	53,76
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	215,05	215,05
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			13225,81	860,22

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto III: Permeado Células/mL	Ponto III: Permeado Organismos/mL
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	+	1,04	0,13
<i>Closteriopsis</i> sp.	Chlo	+	0,03	0,03
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	+	0,03	0,03
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cyan	+	17,53	1,04
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+	3,25	0,03
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			21,88	1,27

ORGANISMOS	Classes	Fito Qualitativo	Ponto IV: concentrado (Células/mL)	Ponto IV: concentrado (Organismos/mL)
<i>Actinastrum hantzschii</i>	Chlo	++	0,00	0,00
<i>Amphora ovalis</i>	Bac	+	0,00	0,00
<i>Aulacoseira granulata</i>	Bac	+	215,05	53,76
<i>Closteriopsis</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum cambricum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum microporum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Coelastrum reticulatum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Cryptomonas erosa</i>	Cryp	++	215,05	215,05
<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryp	++	215,05	215,05
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cyan	+++++	4838,71	645,16
<i>Desmodesmus</i> cf. <i>Opoliensis</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Fragilaria</i> sp.	Bac	+	0,00	0,00
<i>Mallomonas</i> sp.	Chry	+	0,00	0,00
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Cyan	+	0,00	0,00
<i>Micractinium</i> sp.	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Phacus tortus</i>	Eugl	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Scenedesmus</i> cf. <i>Ovalternus</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Selenastrum bibraianum</i>	Chlo	+	0,00	0,00
<i>Sphaerocavum brasiliense</i>	Cyan	+++++	5376,34	53,76
<i>Trachelomonas volvocina</i>	Eugl	+++	215,05	215,05
TOTAIS (Células/mL) e (Organismos/mL)			11075,27	1397,85

10 APÊNDICE: ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Apresentam-se dados referentes às análises físico-químicas feitas no período de maio a agosto de 2008.

Todas as medidas foram realizadas no Laboratório do DESA-UFMG.

A seguir, mostram-se os métodos usados para obtenção dos valores dos parâmetros físico-químicos desta pesquisa.

<i>Alcalinidade total</i>	<i>Titulometria 2320B</i>
Dureza total	Titulometria 2340C
Cor Verdadeira	Espectrofotometria 2120B, após filtragem em membrana de 45 μm
Cor Aparente	
Turbidez	Nefelometria 2130B
pH	Potenciômetro

Análise 01
Data: 15/5/2008
Hora: 10h

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza ($\text{mg L}^{-1} \text{CaCO}_3$)	88	94	89	99
Alcalinidade ($\text{mg L}^{-1} \text{Ca CO}_3$)	99	101	101	101
Cor verdadeira (uH)	9	8	3	5
Cor aparente (uH)	95	86	4	112
Turbidez (uT)	22	22	0,12	14
pH	7,7	7,5	7,5	7,6

Aumento dos valores de dureza total e alcalinidade após o ponto de captação, conforme mostrado acima nos pontos referentes à pré-filtração e ao permeado, são devidos a erros de titulação para determinação destes parâmetros.

O filtro de areia e a membrana de ultrafiltração não removem alcalinidade e dureza total.

Análise 02
Data: 20/5/2008
Hora: 12h 05 min

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	92	92	91	101
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	127	108	102	112
Cor verdadeira (uH)	15	10	4	10
Cor aparente (uH)	120	111	5	150
Turbidez (uT)	29	28	0,15	19
pH	8,2	8,1	8,0	8,0

Análise 04
Data: 29/5/2008
Hora: 12h 10min

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	99	-----	101	-----
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	101	-----	98	-----
Cor verdadeira (uH)	6	-----	4	7
Cor aparente (uH)	134	-----	4	113
Turbidez (uT)		-----	-----	-----
pH	7,6	-----	7,3	7,2

Análise 07
Data: 11/6/2008
Hora: 11h 45min

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	105	----	102	107
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	96	----	93	96
Cor verdadeira (uH)	6	8	5	8
Cor aparente (uH)	88	69	5	106
Turbidez (uT)	25	16	0,20	13
pH	7,8	7,6	7,6	7,6
Temperatura (°C)	24,0	24,3	24,3	24,3

Análise 10
Data: 20/6/2008
Hora: 11h 30min

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	100	-----	97	98
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	111	-----	103	117
Cor verdadeira (uH)	7	-----	3	7
Cor aparente (uH)	86	-----	3	7
Turbidez (uT)	14	-----	0,2	14
pH	7,5	-----	7,7	7,7
Temperatura (°C)	22,0	-----	21,7	22,4

Análise 12
Data: 01/07/2008
Hora: 11h 40min

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	107	-----	95	98
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	112	-----	106	112
Cor verdadeira (uH)	7	5	3	7
Cor aparente (uH)	46	47	3	68
Turbidez (uT)	9	10	0,2	9
pH	7,4	7,6	7,7	7,7
Temperatura (°C)	19,7	19,8	19,9	19,9

Análise 15
Data: 11/07/2008
Hora: 12h

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	106	-----	100	96
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	122	-----	113	117
Cor verdadeira (uH)	6	7	3	5
Cor aparente (uH)	62	127	3	80
Turbidez (uT)	24	40	0,3	17
pH	6,9	7,0	7,0	7,0
Temperatura (°C)	19,9	19,8	19,8	19,7

Análise 17
Data: 11/07/2008
Hora: 12h

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	105	-----	98	101
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	107	-----	-----	----
Cor verdadeira (uH)	6	7	3	12
Cor aparente (uH)	76	22	4	42
Turbidez (uT)	77	5	0,3	6
pH	8,1	7,9	7,8	7,6
Temperatura (°C)	20,1	19,9	20,4	20,3

Análise 19
Data: 14/8/2008
Hora: 13h

Parâmetro	Lagoa (I)	PFA (II)	Permeado	Concentrado
Dureza (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	111	107	103	119
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	107	-----	102	107
Cor verdadeira (uH)	8	7	4	13
Cor aparente (uH)	137	84	4	148
Turbidez (uT)	40	20	0,2	17
pH	8,1	8,1	7,9	8,0
Temperatura (°C)	22,4	22,4	22,5	22,4