

I-134 - TRATAMENTO DA ÁGUA DO LAGO PARANOÁ POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD) EM ESCALA PILOTO

Anderson Soares Pinto

Engenheiro Civil pela Universidade de Brasília (UnB).

Valdir Pires Dantas Filho

Engenheiro Civil pela Universidade de Brasília (UnB).

Arthur Tavares Schleicher

Engenheiro Civil pela Universidade de Brasília (UnB) e Mestrando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (UnB).

Fuad Moura Guimarães Braga⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (UnB). Analista de Sistemas de Saneamento da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb).

Cristina Celia Silveira Brandão

Engenheira Química pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e Doutora em Engenharia Ambiental pelo Imperial College of Science, Technology and Medicine. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB).

Endereço⁽¹⁾: Caesb- Centro de Gestão Águas Emendadas. Av. Sibipiruna Lotes 13/21, Edifício São Francisco – 1º Andar. CEP: 71.928-720, Águas Claras, Brasília - DF. Telefone: +55 (61) 3213.7125 / 3213.7360. Email: fuadbraga@caesb.df.gov.br ou fuadmoura@gmail.com

RESUMO

O lago Paranoá possui como características baixa turbidez e presença de algas. A presença de algas no manancial pode acarretar sobrecarga nos sistemas de tratamento, além de poder desencadear problemas tais como: sabor e odor, corrosão no sistema de distribuição, entre outros. O processo de tratamento convencional geralmente apresenta reduzida eficiência de remoção de algas, principalmente na etapa de sedimentação. Nesse caso, é recomendada a substituição da sedimentação pela flotação. Um aspecto importante para a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido (FAD) é que se garantam as condições ótimas de coagulação/floculação. Neste trabalho, avaliou-se, em caráter preliminar, a influência da taxa de aplicação superficial, tempo de floculação e razão de recirculação, na eficiência da FAD aplicada ao tratamento da água do lago Paranoá. O trabalho foi desenvolvido em escala piloto, utilizando-se como coagulante o sulfato de alumínio e tendo como objetivo a identificação dos parâmetros de projeto mais adequados para aplicação da FAD no tratamento dessa água. A análise dos resultados foi feita a partir dos valores de turbidez, clorofila-a e fitoplâncton da água bruta e clarificada do lago Paranoá. Os resultados indicam que a melhor opção dentre os parâmetros operacionais estudados é a utilização da taxa de aplicação superficial de 360 m/d, tempo de floculação de 7,2 minutos e a razão de recirculação de 10 %, com os quais se obtiveram eficiências médias de remoção de até 64,2% para turbidez, 100% para clorofila-a e 88,9% para fitoplâncton.

PALAVRAS-CHAVE: Flotação por Ar Dissolvido, Tratamento de água do lago Paranoá, Tempo de Floculação, Razão de Recirculação.

INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional no entorno das grandes cidades vem, por um lado, aumentando a demanda por água de boa qualidade, e por outro, gerando degradação dos corpos d'água. O crescimento do DF, hoje com cerca de 2,2 milhões de habitantes, incrementou significativamente a demanda de água tratada, sem, no entanto, acompanhar medidas que preservassem as bacias hidrográficas. Os efeitos dessas ocupações e usos sobre os corpos d'água, são, dentre outros, a erosão, que se reflete no aumento de turbidez da água, e as descargas de águas residuárias e fertilizantes, que provocam o enriquecimento em nutrientes e favorecem a proliferação de algas.

O lago Paranoá foi formado a partir do barramento do rio Paranoá, no ano de 1959, represando águas do Riacho Fundo, do Ribeirão do Gama e do Córrego Cabeça de Veado, ao sul, e do Ribeirão Torto e do Córrego

Bananal, ao norte, além de pequenos córregos que drenam diretamente para o Lago. Além de contar com as contribuições dos afluentes principais, a unidade hidrográfica do lago Paranoá recebe águas da drenagem pluvial urbana e dos efluentes das duas estações de tratamento de esgotos situadas nas suas margens (ETE Sul e Norte). Recebe, também, a contribuição de corpos d'água de menor porte, como os córregos Taquari e Cachoeirinha.

A recente decisão de uso do lago Paranoá para abastecimento humano marca um novo capítulo da história do lago e configura um desafio para a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb), que pela primeira vez captará água em uma bacia urbana que recebe efluentes de Estações de Tratamento de Esgoto, operadas pela própria Companhia.

Araujo e Oliveira (2009), conduzindo estudo em escala de bancada, contribuíram para a identificação dos parâmetros de projeto mais adequados para aplicação da tecnologia de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no tratamento da água do lago Paranoá, considerando dentre as especificidades deste manancial o problema de remoção de algas.

Schleicher *et al.* (2010) realizaram experimentos em Instalação Piloto de FAD aplicada ao tratamento da água do lago Paranoá. O flotador foi operado com taxa de aplicação superficial de 230 m/d, em experimentos com duração média de 4 horas. O efluente do flotador (água clarificada) apresentou um valor médio de turbidez de 0,55uT e clorofila-a dentro do intervalo de 0 a 1,7 mg/L. Os autores concluíram que, em função da qualidade obtida para a água clarificada, a taxa de flotação de 230 m/d foi considerada conservadora e recomendaram, entre outras ações, a avaliação de taxas de aplicação superficial mais elevadas na flotação.

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as condições de aplicação da flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento da água do lago Paranoá, contribuindo para a identificação dos parâmetros de projeto mais adequados no uso dessa tecnologia. Para tal, foram consideradas conclusões e recomendações de trabalhos anteriores feitos com a mesma água de estudo (Araujo e Oliveira, 2009 e Schleicher *et al.*, 2010). Os objetivos específicos são avaliar, em escala piloto, a influência no processo de FAD dos seguintes parâmetros operacionais: i) tempo de floculação; ii) taxa de aplicação superficial na câmara de flotação; e, iii) razão de reciclo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na Instalação Piloto da Estação de Tratamento de Água Brasília (ETA Brasília) da Caesb (Figura 1).



Figura 1: Visão geral da ETA Piloto.

DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO E SEU FUNCIONAMENTO

Na instalação piloto, mostrada na Figura 1 e no esquema da Figura 2, tem como principais elementos: um dispositivo de mistura rápida (DMR), composto por um injetor, no qual ocorria a adição de coagulante; um floculador do tipo mecânico, subdividido em seis câmaras em série; e um sistema de flotação por ar dissolvido.

A configuração do floculador adotado permite trabalhar com seis, quatro ou duas câmaras em série, produzindo tempos de detenção distintos, em função das vazões aplicadas e do arranjo de câmaras. O floculador era operado com gradiente de velocidade de cerca de 80s^{-1} .

O sistema de flotação era composto por tanque de flotação, bomba de reciclo, regulador da vazão recirculada e sistema de saturação. Para permitir a visualização do processo, o tanque de flotação, cuja descrição é detalhada por Pinto e Dantas Filho (2010), foi confeccionado com as laterais em acrílico transparente, com área superficial útil de flotação de 0,26 m² (30 cm x 85 cm) e profundidade útil de 100 cm. A recirculação do efluente do flotador para o sistema de saturação, e conseqüente formação de micro bolhas para a flotação, era realizada com a coleta da água clarificada em um tanque a jusante do flotador. A água era bombeada para uma coluna de saturação onde era saturada com o ar oriundo de um compressor. Posteriormente, seguia para a entrada do flotador, em que a formação de micro bolhas para a flotação era controlada por meio de um registro do tipo agulha.

A câmara de saturação utilizada, feita em coluna de acrílico transparente de 1,50m de altura (dos quais 100 cm eram preenchidos com recheio), com diâmetro interno de 105 mm e espessura de parede de 10 mm, capaz de suportar uma pressão máxima de 1250 kPa. A alimentação de água ocorre pelo topo da coluna em contracorrente com o fluxo de ar. A entrada de ar é dotada de registros e filtro de ar, de modo a assegurar uma qualidade adequada do ar utilizado.

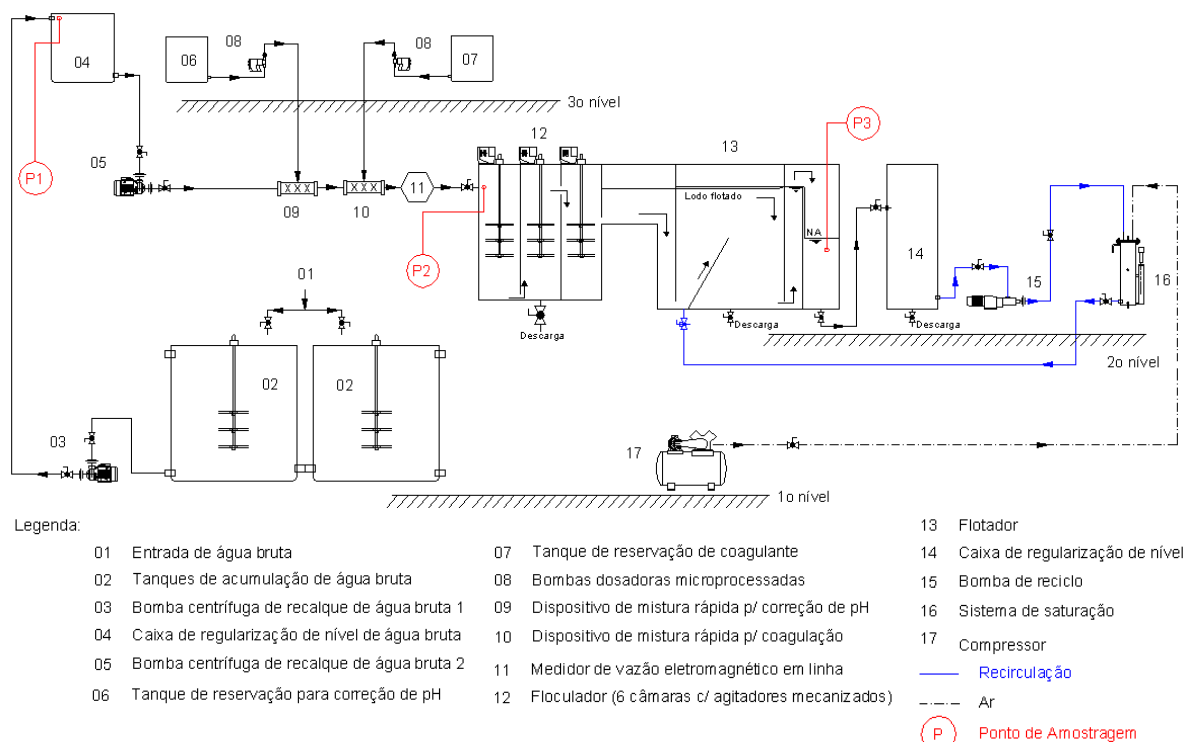


Figura 2: Diagrama esquemático da Instalação Piloto.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Segundo os resultados dos experimentos de Araújo e Oliveira (2009), o coagulante que apresentou melhores eficiências nos ensaios de flotação em escala de bancada com água do lago Paranoá foi o sulfato de alumínio, com o pH de coagulação em torno de 6,0. Assim, no presente trabalho também foram utilizadas essas condições (sulfato de alumínio e pH em torno de 6,0).

Tendo em vista os objetivos do trabalho, em cada etapa experimental foram avaliados os seguintes parâmetros: (i) tempo de floculação, (ii) taxa de aplicação e (iii) razão de reciclo. Cada etapa da investigação experimental corresponde à avaliação de um dos três parâmetros citados, sendo que os demais parâmetros foram mantidos constantes. A Tabela 1 resume os parâmetros selecionados para o desenvolvimento experimental.

Tabela 1– Condições experimentais avaliadas.

Parâmetro avaliado	Parâmetros					
	$G_{MR} (s^{-1})$	$G_{Floc} (s^{-1})$	$P_{Sat} (atm)$	TAS (m/d)	$T_{Floc} (min)$	R(%)
Tempo de floculação	>800	80*	5*	240*	16,4 10,8	10*
Taxa de aplicação superficial				360	10,8 7,2	10*
Razão de reciclo						6,5

(*) Valores adotados na concepção de projeto da futura ETA para o lago Paranoá

Legenda: G_{MR} : Gradiente de velocidade de mistura rápida; G_{Floc} : Gradiente de velocidade de floculação; T_{Floc} : Tempo de floculação; P_{Sat} : Pressão de saturação; TAS: Taxa de aplicação superficial no flotador; R: Razão de recirculação

Os valores dos parâmetros mantidos constantes ao longo das etapas experimentais foram baseados nos valores utilizados na elaboração do projeto da futura ETA Paranoá, exceto o gradiente da mistura rápida que é inerente ao dispositivo adotado para esse fim. Com relação aos três parâmetros avaliados tem-se:

- Para o tempo de floculação foram testados os tempos de 16,4 minutos (82% do tempo de projeto), 10,8 minutos (54% do tempo de projeto) e 7,2 minutos (36% do tempo de projeto) com o objetivo de avaliar a eficiência do tratamento para tempos de floculação menores que o previsto em projeto. Vale observar que os tempos testados estão relacionados com as características do floculador e da TAS empregada.
- Para a taxa de aplicação superficial de flotação, além da taxa de projeto (240 m/d), foi testada a taxa de 360 m/d (1,5 da taxa de projeto) conforme sugerido por Araújo e Oliveira (2009).
- Para razão de reciclo: 10%, e 6,5%.

Para cada condição avaliada, foram realizados experimentos para verificação de reprodutibilidade dos resultados. Esses experimentos foram divididos em 5 etapas experimentais, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2– Parâmetros avaliados nas 5 etapas experimentais.

Etapa Experimental	Número de experimentos realizados	Taxa de aplicação superficial no flotador (m/d)	Tempo de floculação (min)	Razão de recirculação (%)
A	3	240	10,8	10
B	3	240	16,4	10
C	3	360	7,2	10
D	2	360	10,8	6,5
E	2	360	10,8	10

ROTINA DOS EXPERIMENTOS NA ETA-PILOTO

A água do lago Paranoá utilizada para o desenvolvimento do trabalho era coletada, no dia de realização de cada experimento, em um ponto próximo da futura captação de água, como mostra a Figura 3. A coleta de água era realizada, por meio de caminhão tanque, a uma distância de cerca de aproximadamente 20 metros da margem do lago onde a profundidade varia de 1,0 a 1,5 metros. Depois disso, a água era transportada à ETA Piloto e reservada em quatro caixas, totalizando 16m³. Procurava-se coletar a água durante a manhã para que o experimento fosse iniciado no começo da tarde do mesmo dia, a fim de minimizar o risco de degradação da matéria orgânica presente na água bruta.

Cada experimento de flotação foi precedido por uma rotina de inspeções das condições da ETA Piloto no que se refere à limpeza das unidades (tanques) e equipamentos (bombas e medidor de vazão), assim como funcionamento, calibração de equipamentos e inspeção de unidades e tubulações (detecção de vazamentos).

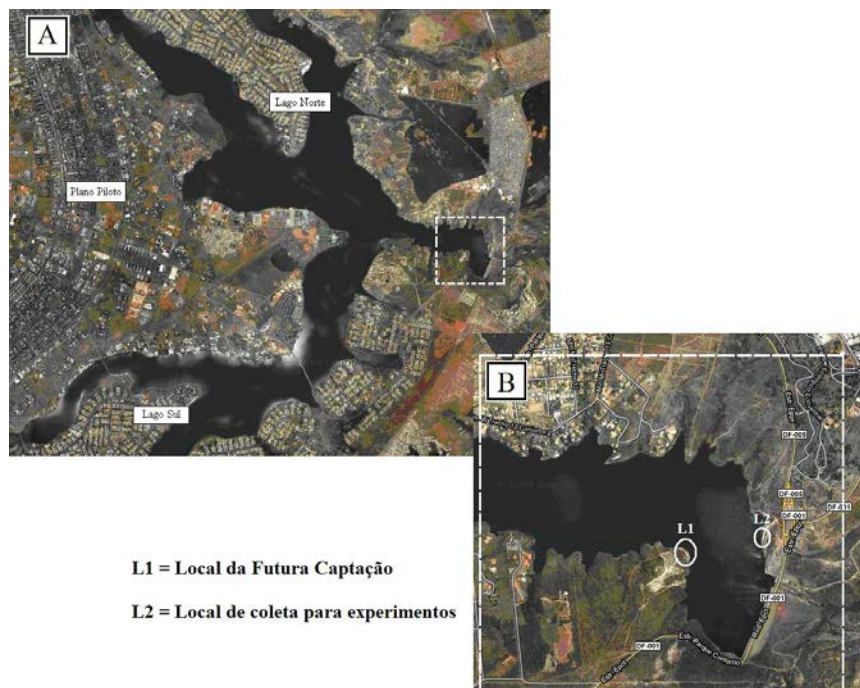


Figura 3: Local de coleta da água bruta para os experimentos (L1).

Com esses procedimentos realizados, definia-se a dosagem de coagulante a ser usada no experimento, por meio da realização de testes de jarro. As condições de coagulação, floculação e flotação adotadas no teste de jarros foram, respectivamente: gradiente de mistura rápida de 1000 s^{-1} por 1 minuto; gradiente de floculação de 80 s^{-1} , gradiente por 12 minutos; razão de reciclo de 10%, pressão de saturação de ar de 500 KPa e taxa de aplicação superficial da flotação de 240 m/d (equivale a amostragem de água clarificada entre 33 e 53 segundos após introdução do volume de água saturada). Obtidas as amostras de água clarificada, determinava-se a turbidez para a amostra de cada jarro.

Com a identificação da dosagem ótima, era preparada a solução de coagulante a ser utilizada no experimento. Para tal, levava-se em consideração a dosagem encontrada, a vazão de alimentação da instalação piloto (definida em função da TAS aplicada ao flotador no experimento) e a vazão da bomba dosadora (balanço de massa). A verificação da vazão afluente à sequência de tratamento era realizada por meio do medidor de vazão eletromagnético.

Ao longo da carreira de flotação (experimento), para avaliar a eficiência total da sequência de tratamento, e também do flotador, eram feitas coletas de amostras do afluente e efluente do flotador para medidas de turbidez e pH. Eram também coletadas amostras para posterior determinação, em laboratório, da biomassa de algas presentes (clorofila-a) e contagem de fitoplâncton. A Tabela 3 apresenta os pontos de coleta, as frequências de amostragem e método analítico de cada parâmetro monitorado ao longo da investigação experimental.

Tabela 3 - Detalhes das análises dos diferentes parâmetros de qualidade da água.

Parâmetros	Método	Frequência	Pontos de Amostragem
Turbidez	Nefelométrico	A cada 30 minutos	Água bruta (P1 – Fig 2) Água coagulada* (P2 – Fig 2) Água clarificada (P3 – Fig 2)
pH	Potenciométrico	A cada 30 minutos	
Clorofila-a	Extração em solução de acetona 90%, e determinação da absorbância em comprimentos de onda de 665 e 750 nm	Variável	
Contagem de Fitoplâncton	Microscopia óptica	Variável	

(*) apenas para o pH

Além de parâmetros de qualidade da água, também eram realizadas leituras de vazão de alimentação da Piloto, por meio do medidor de vazão eletromagnético; vazão de reciclo do sistema de saturação do flotador, por meio de rotâmetro e pressão do saturador, por meio de manômetro. Essas leituras eram realizadas a cada 30 minutos.

RESULTADOS

Para facilitar a compreensão e análise os resultados foram separados nos grupos A, B, C, D e E. Cada grupo é composto por experimentos realizados em diferentes dias, porém mantendo os mesmos parâmetros operacionais (taxa de aplicação superficial, tempo de floculação e razão de reciclo). Os dias de realização dos experimentos e a composição dos parâmetros de cada grupo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Detalhes das análises dos diferentes parâmetros de qualidade da água.

Grupos	Experimento	Data de realização do experimento	Taxa de aplicação superficial TAS (m/d)	Tempo de floculação TF (min)	Razão de recirculação R (%)
A	A1	04/12/2009,	240	10,8	10
	A2	11/12/2009 e			
	A3	13/04/10			
B	B1	19/04/10,	240	16,4	10
	B2	26/04/10 e			
	B3	03/05/10			
C	C1	31/05/10,	360	7,2	10
	C2	7/06/10 e			
	C3	21/06/10			
D	D1	12/07/10 e	360	10,8	6,5
	D2	19/07/10			
E	E1	26/07/10 e	360	10,8	10
	E2	02/08/10			

A análise dos dados dos experimentos é dividida em dois momentos. O primeiro consiste em analisar cada grupo separadamente observando a ocorrência de semelhanças dos resultados encontrados, validando a reprodutibilidade do processo. Num segundo momento compara-se entre os grupos a influência dos parâmetros operacionais da FAD na eficiência do tratamento da água do lago Paranoá, de forma a identificar a taxa de aplicação superficial, o tempo de floculação e a razão de recirculação mais indicada para o referido tratamento. A comparação entre os grupos considera a variação de um parâmetro, mantendo os dois parâmetros restantes com valores próximos, resultando nos seguintes arranjos:

- Grupo A com Grupo E, no qual se avalia a influência da taxa de aplicação superficial (240 m/d x 360 m/d).
- Grupo A com Grupo B, no qual se avalia a influência do tempo de floculação para a taxa de 240 m/d (10,8 minutos e 16,4 minutos).
- Grupo C com grupo E, no qual se avalia a influência do tempo de floculação para a taxa de 360 m/d (7,2 minutos e 10,8 minutos).
- Grupo D com grupo E, no qual se avalia a influência da razão de recirculação (10% e 6,5 %).

A Tabela 5 apresenta as características da qualidade da água bruta no período em que foram realizados os experimentos.

Tabela 5 - Características da água bruta da água do lago Paranoá.

Parâmetros	Valores		
	Máximo	Mínimo	Média
pH	7,9	6,8	7,2
Turbidez (uT)	7,2	1,7	2,9
Fitoplâncton (Ind/L)	1,5E+07	4,6E+05	2,9E+06
Clorofila-a (µg/L)	6,5	0,4	3,1

Na realização de todos os experimentos, o pH de coagulação foi da ordem de 7,0, sendo utilizado como coagulante o sulfato de alumínio com a dosagem de 8 mg/L (dosagem e pH definidos por meio da realização de testes de jarro, corroborada pelos experimentos realizados por Araújo e Oliveira (2009)). Esses valores são semelhantes aos usados em trabalhos anteriores em que se utilizou a mesma água de estudo (Cezar, 2000; Braga, 2005; entre outros).

FASE 1: Análise dos dados dos grupos A, B, C, D e E

Grupo (A)

O grupo A é composto por três experimentos (ver Tabela 4), sendo que os dois primeiros foram realizados em Dezembro de 2009 e o último em Abril de 2010. A Figura 4 e a Tabela 6 resumem os principais resultados obtidos.

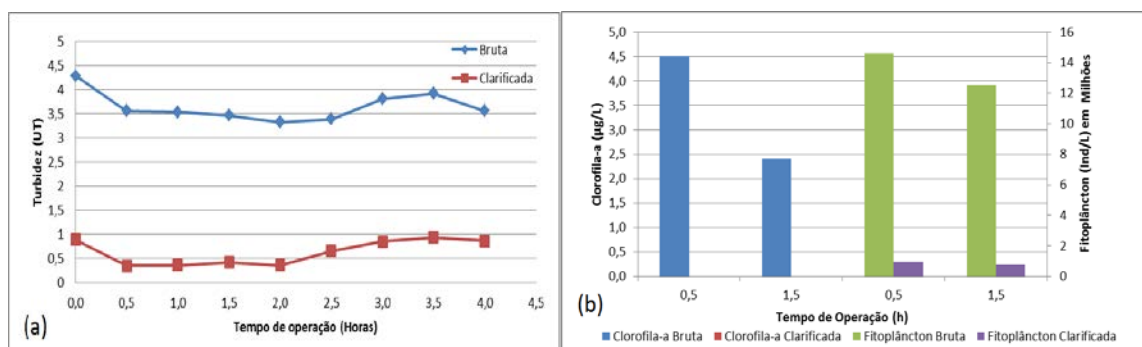


Figura 4- Valores de turbidez (a) e contagem de fitoplâncton e clorofila-a (b) da água bruta e clarificada ao longo do experimento A1 (TAS- 240 m/d; TF- 10,8 min; R- 10%).

Tabela 6– Eficiência média de remoção de turbidez, clorofila-a e fitoplâncton nos experimentos do grupo A.

A	Tx=240 m/d Tf=10,8 min R=10%				
	Turbidez média da água bruta (UT)	Turbidez residual média (UT)	Eficiência média de remoção de turbidez	Eficiência média de remoção de clorofila	Eficiência média de remoção de fitoplâncton
A1	3,7	0,63	81,5%	100,0%	93,5%
A2	3,1	0,46	88,5%	80,0%	89,6%
A3	5,6	0,79	85,0%	77,7%	60,0%

Em razão dos experimentos terem sido realizados em diferentes períodos do ano, houve uma grande diferença entre os valores de turbidez da água do lago Paranoá (3,5 UT em Dezembro/09 chegando a 6,5 UT em Março/10). Entretanto, a eficiência do sistema com relação à turbidez apresentou valores próximos e índices considerados bons, tendo como melhor resultado a marca de 88,5% de remoção de turbidez. Vale ressaltar que, entre todos os experimentos realizados, esse grupo de experimento foi o que apresentou melhor resultado para remoção de turbidez.

Pode-se observar, a partir da Figura 4b e da Tabela 6, que a remoção de clorofila-a e fitoplâncton atingiram bons resultados, chegando inclusive, no experimento A1, à remoção total da clorofila-a. Nota-se também que os experimentos A1 e A2 apresentaram resultados semelhantes entre si e maiores do que o experimento A3, diferença que pode ter sido ocasionada pela realização dos experimentos em diferentes períodos do ano. O terceiro experimento desse grupo apresentou valores médios de eficiência de remoção de 77,7% para clorofila-a e de 60,1% para fitoplâncton. Observa-se ainda que nesse experimento a remoção de turbidez foi superior à remoção de clorofila-a e fitoplâncton.

Grupo (B)

O Segundo grupo de experimentos (Grupo B) é composto por três experimentos realizados em períodos próximos. O grupo difere do grupo A por utilizar um tempo de floculação de 16,4 minutos, mantendo os valores de 240 m/d para a taxa de aplicação superficial e 10% para a razão de reciclo. A água do lago Paranoá

passou a apresentar menor turbidez inicial com o passar dos dias, durante o período de meados de abril a começo de maio, variando de 3,5 UT em 19 de Abril/10, a 2,5 UT em 03 de maio.

Ao final da duração dos experimentos, a água clarificada apresentava valores próximos a 1 UT de turbidez, valor limitado pela portaria do Ministério da Saúde 518/2004 para efluente dos filtros rápidos. Ou seja, a qualidade produzida em relação à turbidez pode ser considerada boa.

Novamente foram observados valores iniciais diferentes para contagem de fitoplâncton nos três experimentos embora os valores estejam na mesma ordem de grandeza em cada experimento. Para valores da água bruta, tem-se aumento na contagem de fitoplâncton entre o horário da primeira coleta e da última coleta, exceto para o último experimento que manteve o mesmo. Não é possível dizer se esse comportamento ocorria de fato ou se é resultado da incerteza inerente à contagem de fitoplâncton, uma vez que os valores de clorofila-a não apresentaram a mesma tendência.

A remoção de fitoplâncton na FAD apresentou eficiência próxima nos três experimentos (Tabela 7) tendo o maior valor de 61,4%. Na remoção de clorofila-a nos experimentos desse grupo, a eficiência variou de 47,4% a 68,8%.

Como mostrado pela Figura 5, o experimento B1 apresentou melhores (e mais estáveis) resultados na eficiência de remoção de turbidez, além de resultados compatíveis com os demais experimentos do grupo em relação à remoção de fitoplâncton e clorofila-a. Os demais experimentos possuem valores próximos ao primeiro mostrando semelhança e reprodutibilidade do processo. O terceiro experimento apesar de apresentar o menor valor de eficiência de remoção de turbidez é o que promoveu melhores resultados na remoção de fitoplâncton como de clorofila-a.

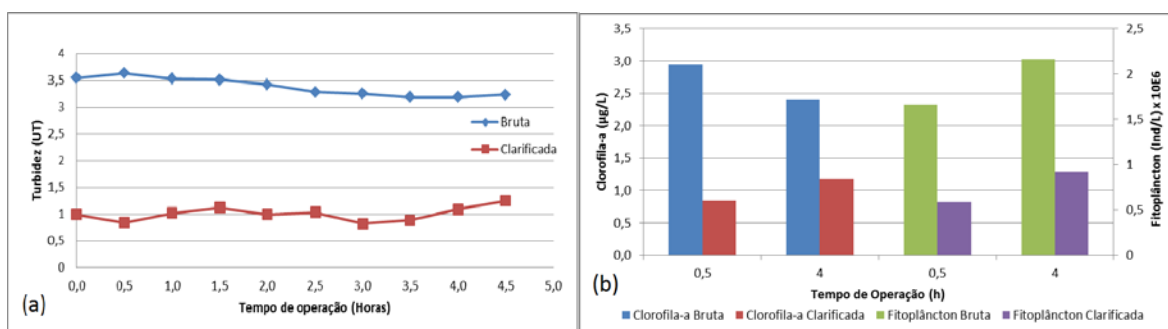


Figura 5 - Valores de turbidez (a) e contagem de fitoplâncton e clorofila-a (b) da água bruta e clarificada ao longo dos experimentos de FAD do grupo B1 (TAS- 240 m/d; TF- 16,4 min; R- 10%).

Tabela 7– Eficiência média de remoção de turbidez, clorofila-a e fitoplâncton nos experimentos do grupo B.

B	Tx=240 m/d Tf=16,4 min R=10%				
	Turbidez média da água bruta (UT)	Turbidez residual média (UT)	Eficiência média de remoção de turbidez	Eficiência média de remoção de clorofila	Eficiência média de remoção de fitoplâncton
B1	3,4	1,0	70,0 %	62,0 %	60,0 %
B2	2,5	1,1	59,3 %	47,4 %	59,8 %
B3	2,2	1,2	48,0 %	68,8 %	61,4 %

Grupo (C)

O grupo C é composto por três experimentos realizados no mês de Junho/10, sendo o primeiro grupo de experimentos do presente trabalho em que se adotou a taxa de aplicação superficial de 360 m/d.

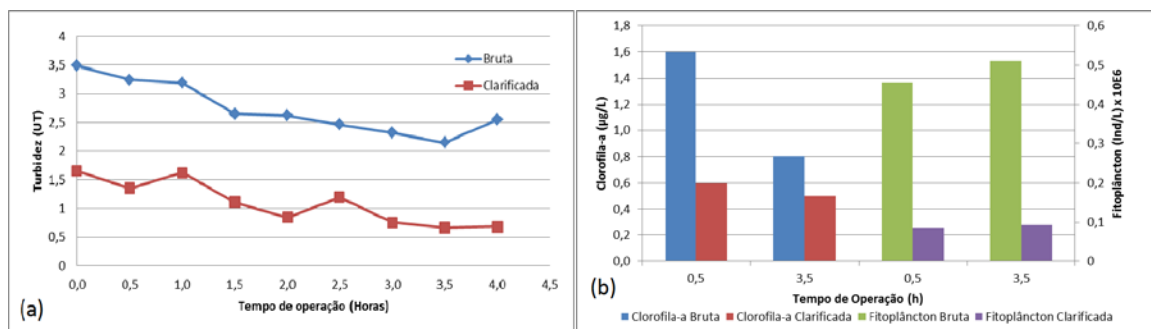


Figura 6 - Valores de turbidez (a) contagem de fitoplâncton e clorofila-a (b) da água bruta e clarificada ao longo do experimento C3 (TAS- 360 m/d; TF- 7,2 min; R- 10%).

Os valores iniciais de turbidez para água bruta nos experimentos estão bastante próximos, não ocorrendo muita variação dos valores de turbidez da água do lago Paranoá ao longo desse mês. A Figura 6a, entretanto, mostra valores decrescentes de turbidez de água bruta, provavelmente devidos à sedimentação no tanque de armazenamento. A Figura 6b mostra valores consideravelmente diferentes de clorofila-a na água bruta do experimento C3, entretanto valores residuais bastante próximos. De maneira geral, os experimentos demonstraram comportamento semelhante, proporcionando bons resultados em relação à turbidez residual com o aumento da TAS.

A eficiência média de remoção de fitoplâncton (Tabela 8) desse grupo de experimentos apresentou maiores valores em comparação aos grupos A e B. Entretanto, cabe observar a maior variabilidade da contagem de fitoplâncton entre os experimentos do grupo. Ainda pode-se observar da Tabela 8 que a remoção de clorofila-a atingiu resultados diferentes para os três experimentos, sendo que o segundo experimento do grupo atingiu eficiência média de remoção de até 100% (não foi possível a detecção de algas).

Tabela 8– Eficiência média de remoção de turbidez, clorofila-a e fitoplâncton nos experimentos do grupo C.

C	Tx=360 m/d Tf=7,2 min R=10%				
	Turbidez média da água bruta (UT)	Turbidez residual média (UT)	Eficiência média de remoção de turbidez	Eficiência média de remoção de clorofila	Eficiência média de remoção de fitoplâncton
C1	3,4	1,8	64,2%	80,0%	78,0%
C2	3,4	1,2	60,9%	100,0%	88,9%
C3	2,7	1,1	57,6%	54,2%	81,3%

Grupo (D)

O grupo D é composto por dois experimentos utilizando uma razão de recirculação menor que os demais grupos (6,5%), observando principalmente, a influência da razão de reciclo sobre a eficiência da FAD aplicada ao tratamento da água do lago Paranoá.

Os dados da Figura 7a mostram que apesar dos baixos valores de turbidez da água bruta a eficiência média de remoção de turbidez foi baixa (Tabela 9) e esse grupo apresentou os piores resultados em relação aos demais.

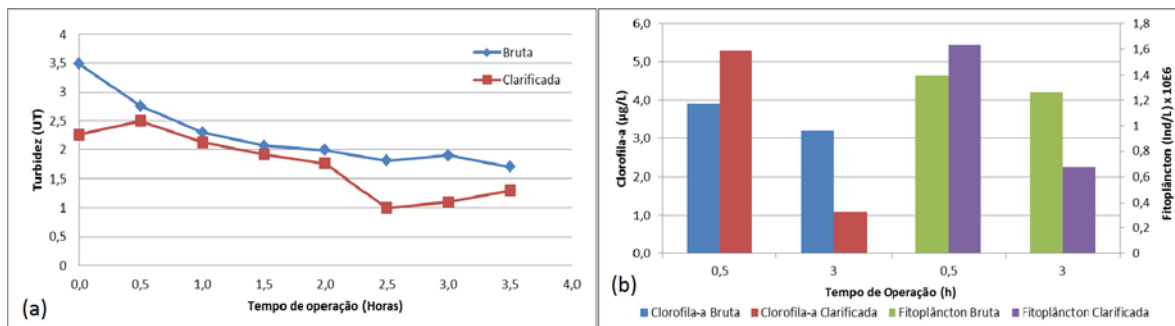


Figura 7 - Valores de turbidez (a) e contagem de fitoplâncton e clorofila-a (b) da água bruta e clarificada ao longo do experimento D1 (TAS- 360 m/d; TF- 10,8 min; R- 6,5%).

Da Figura 7b percebem-se baixos valores na remoção de fitoplâncton e clorofila-a. Nota-se da Tabela 9 que a eficiência média de remoção de clorofila-a e fitoplâncton foi baixa chegando a valores de apenas 9,9% no experimento D1.

Tabela 9– Eficiência média de remoção de turbidez, clorofila-a e fitoplâncton nos experimentos do grupo D.

D	Tx=360 m/d Tf=10,8 min R=6,5%				
	Turbidez média da água bruta (UT)	Turbidez residual média (UT)	Eficiência média de remoção de turbidez	Eficiência média de remoção de clorofila	Eficiência média de remoção de fitoplâncton
D1	2,3	1,7	9,4%	9,9%	13,3%
D2	2,3	1,7	30,2%	11,6%	10,9%

Grupo (E)

O grupo E engloba dois experimentos com taxa de aplicação superficial de 360 m/d, porém com o aumento do tempo de floculação. Esse grupo corresponde ao último grupo de experimentos realizados no mês de julho de 2010.

Os dados de turbidez (Tabela 10 e Figura 8a) mostram valores iniciais de água bruta muito próximos e baixos em torno de 2,2 UT. Apesar disso, a turbidez residual na maior parte do tempo foi superior a 1 UT, sugerindo um impacto negativo no aumento do tempo de floculação. A eficiência média de remoção de turbidez (Tabela 10) foi bem discrepante, e da Figura 8a observa-se o baixo desempenho de remoção de fitoplâncton e clorofila-a no experimento E1.

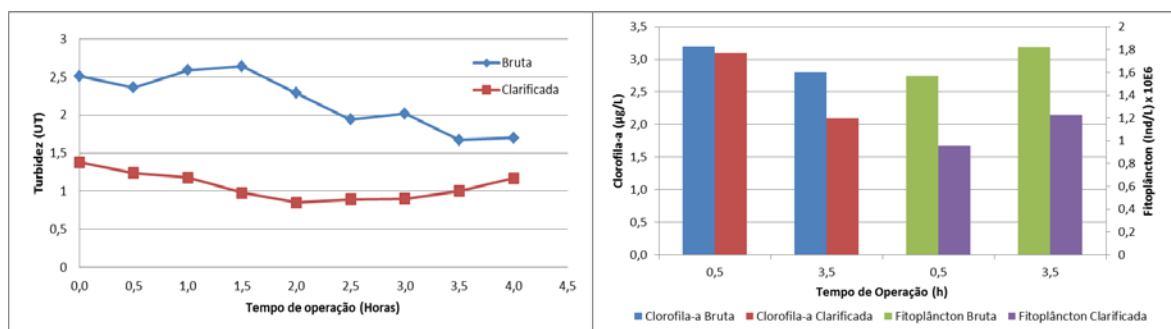


Figura 8 - Valores de turbidez (a) e contagem de fitoplâncton e clorofila-a (b) da água bruta e clarificada ao longo dos experimentos de FAD do grupo E1 (TAS- 360 m/d; TF- 10,8 min; R- 10 %).

Tabela 10– Eficiência média de remoção de turbidez, clorofila-a e fitoplâncton nos experimentos do grupo E.

E	Tx=360 m/d Tf=10,8 min R=10%				
	Turbidez média da água bruta (UT)	Turbidez residual média (UT)	Eficiência média de remoção de turbidez	Eficiência média de remoção de clorofila	Eficiência média de remoção de fitoplâncton
E1	2,2	1,1	56,3%	13,3%	36,6%
E2	2,2	1,5	29,7%	45,0%	49,3%

FASE 2: Análise comparativa entre os grupos

A segunda etapa da análise dos resultados consiste em identificar a influência dos parâmetros operacionais estudados na eficiência do tratamento da água do lago Paranoá (taxas de aplicação superficial, tempo de floculação e razão de recirculação). A análise se baseia na comparação proposta no início do capítulo 5 do presente trabalho.

Grupo A com Grupo E (TAS 240 m/d x 360 m/d).

O objetivo da comparação desses grupos é de se poder avaliar a influência da taxa de aplicação superficial mantendo o tempo de floculação e razão de reciclo os mesmos para os dois grupos.

Com a TAS de 240 m/d os resultados mostram uma maior eficiência de remoção de turbidez do que a TAS de 360 m/d, porém deve-se levar em consideração que o valor médio de turbidez da água bruta para os experimentos do grupo A são superiores aos do grupo E, e que os valores de turbidez da água clarificada após o tratamento por meio da FAD, para os experimentos nas duas condições são similares.

O experimento A3 do grupo A e os dois experimentos do grupo E (E1 e E2) são os mais representativos para a análise comparativa dos dados de fitoplâncton e clorofila-a, pois apresentam coletas no tempo de operação similares. Esses dados apesar de mostrarem valores de eficiência média de remoção maiores para o experimento A3, apresentam valores residuais para a água clarificada de mesma ordem de grandeza na remoção de fitoplâncton. Os dados do experimento A3 para remoção de clorofila-a apresentaram resultados melhores que os experimentos do grupo E na primeira coleta e similares na última coleta.

Considerando a qualidade da água produzida e os menores custos associados a adoção da taxa de aplicação superficial de 360 m/d, sugere-se preliminarmente que a etapa de flotação por ar dissolvido no tratamento da água do lago Paranoá seja projetada com esse maior valor.

Grupo A com Grupo B (T_{FL} : 10,8 min x 16,4 min).

A comparação dos resultados desses grupos visa observar a influência do melhor tempo de floculação (10,8min ou 16,4min) para a taxa de aplicação superficial de 240 m/d.

Os resultados de remoção média de clorofila-a e fitoplâncton são bastante semelhantes nos dois grupos, sendo que o experimento mais representativo do grupo A apresenta uma pequena superioridade. Adicionalmente, a turbidez residual é consistentemente menor que 1 UT em A e em torno de 1 UT em B, sendo que a eficiência de remoção média da turbidez do grupo A é a melhor do que nos demais grupos.

Observando os resultados desses dois grupos, pode-se concluir que, ao se considerar a taxa de aplicação superficial de 240m/d, não se faz necessário um maior tempo de floculação. Um menor tempo de floculação significa unidades de floculação mais compactas com menor custo de implantação.

Grupo C com grupo E (T_{FL} : 7,2 min x 10,8 min).

A análise comparativa dos resultados desses dois grupos visa avaliar a influência do tempo de floculação (7,2 e 10,8 minutos) ao se adotar uma taxa de aplicação superficial de 360 m/d.

Analisando os dados da eficiência de remoção de turbidez e valores finais após o tratamento, tem-se que os experimentos do grupo C (T_{FL} = 7,2 min) apresentaram resultados melhores que o grupo E (T_{FL} = 10,8 min).

Na comparação desses grupos, observou-se que a eficiência média de remoção de clorofila-a do grupo C foi maior que o grupo E em todos os experimentos, chegando a ter remoção de 100% no experimento C2. Comparando a contagem de fitoplâncton entre esses grupos, o grupo com menor tempo de floculação (grupo C) apresentou melhores resultados para a remoção.

Um tempo de floculação menor parece favorecer melhores resultados para o tratamento da água do lago Paraná, sendo, portanto, recomendável aprofundar a avaliação da influência de tempos menores para o tratamento da água desse lago.

Grupo D com grupo E (R: 10,5% x 6,5%).

A comparação dos últimos grupos de experimentos permite avaliar, preliminarmente, a influência da razão de recirculação no tratamento por flotação por ar dissolvido da água do lago Paranoá. Os valores da razão de reciclo testadas foram de 6,5% e 10% para os grupos D e E respectivamente.

Os valores iniciais médios de turbidez para os dois grupos são basicamente os mesmos, permitindo comparar as eficiências de remoção. Os quadros de eficiência média de remoção de turbidez mostram melhores resultados para os experimentos do grupo E, razão de reciclo de 10%. A utilização da razão de recirculação de 6,5% apresentou os piores resultados entre todos os grupos chegando a apresentar eficiência de remoção de apenas 9,36%, não sendo recomendável a sua utilização para o tratamento da água do lago Paranoá.

Ao se analisar a contagem de fitoplâncton entre os grupos, observou-se semelhança para a água bruta, contudo os valores para água clarificada apresentam ligeira diferença de forma que o grupo E apresentou melhores

resultados na remoção. Observa-se ainda que, na eficiência média de remoção de clorofila-a, houve melhores resultados para o grupo E.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou avaliar preliminarmente, em escala piloto, a aplicabilidade do processo de flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento da água do lago Paranoá, estudando a influência de alguns parâmetros operacionais, a saber: tempo de floculação, taxa de aplicação superficial e razão de recirculação. Em linhas gerais, a aplicação da FAD no tratamento da água do lago Paranoá mostrou-se adequada, apresentando bons resultados quanto à qualidade da água clarificada na flotação (turbidez, clorofila-a e fitoplâncton). Vale ressaltar, que as conclusões e recomendações apresentadas a seguir devem considerar as limitações encontradas durante a realização dos experimentos.

Após a análise dos grupos, pode-se perceber que valores de eficiência de remoção de turbidez superiores a 80% foram obtidos para taxas de aplicação superficial de 240 m/d. Entretanto, considerando que a turbidez efluente da FAD nos experimentos realizados com taxa de aplicação superficial de 360 m/d atenderam as recomendações da Portaria MS 518/2004 com relação à qualidade da água filtrada (≤ 1 uT) e que no presente trabalho a etapa de filtração não foi avaliada, recomenda-se então intensificar estudos com taxas de flotação da ordem de 360 m/d, diante do potencial apresentado para aplicação na etapa de flotação por ar dissolvido no tratamento da água do lago Paranoá.

Para as taxas de recirculação estudadas (10% e 6,5%), percebe-se que a razão de recirculação de 6,5% promoveu os piores resultados entre os grupos, não sendo recomendável a sua utilização para o tratamento da água do lago Paranoá. Em relação aos tempos de floculação, observou-se que, para o tempo de 7,2 minutos, foram encontrados, de um modo geral, os melhores valores de eficiência média de remoção de turbidez, fitoplâncton e clorofila-a, sugerindo que um tempo de floculação menor parece favorecer melhores resultados para o tratamento da água do lago Paranoá, sendo, portanto recomendável aprofundar estudos sobre a influência de tempos menores para o tratamento dessa água.

Após análise de todos os grupos e as suas comparações sugere-se que a melhor opção entre os parâmetros estudados para o tratamento por meio da flotação por ar dissolvido para a água do lago Paranoá é a utilização de uma taxa de aplicação superficial de 360 m/d, tempo de floculação de 7,2 minutos e a razão de recirculação de 10%. Ainda recomendam-se estudos que avaliem a influência desses parâmetros operacionais, otimizados neste trabalho, considerando o tratamento completo, ou seja, incluindo a etapa de filtração. A título de comparação com FAD, recomendam-se também estudos com técnicas avançadas de tratamento de água, como a avaliação de filtração por membranas.

Para a realização do presente trabalho algumas limitações foram encontradas, como a dificuldade de transporte e armazenamento da água do lago Paranoá (que limitou o tempo de duração dos experimentos), interdependência dos parâmetros operacionais na ETA-Piloto, o que dificultava a variação livre de alguns dos parâmetros estudados (tempo de floculação e taxa de aplicação superficial). Assim, sugere-se que para futuros estudos no tratamento da água do lago Paranoá seja construída uma nova ETA-Piloto próximo às margens desse lago, com uma captação direta no manacial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAÚJO, F. B. OLIVEIRA, G. V. (2009). Aplicação do Processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no Tratamento da Água do Lago Paranoá [Distrito Federal]. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 84 p.
2. BRAGA, F. M. G. (2005). Dupla Filtração em Filtros Ascendentes de Pedregulho e Filtros Descendentes de Areia Aplicada à Remoção de Algas: Influência da Taxa de Filtração e Granulometria do Filtro de Areia. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-084/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174p.
3. CEZAR, M. C. M. (2000). Aplicabilidade da (Pré) Filtração Ascendente em Pedregulho como Pré-Tratamento para a Filtração Rápida de Águas com Presença de Algas. Dissertação de Mestrado de

- Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.129.
4. SCHLEICHER, A. T. BRAGA, F. M. G. BRANDÃO, C.C.S. (2010). Avaliação do Processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no Tratamento da Água do lago Paranoá (Brasília/DF). X SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2010. Anais. Maceió, AL, 2010.
 5. PINTO, A.S. e FILHO, V.P.D. (2010). Tratamento da Água do Lago Paranoá Por Flotação por Ar Dissolvido em Escala Piloto. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.