

XII-1564 – REMOÇÃO DE MICROESFERAS FLUORESCENTES E ESPOROS DE BACTÉRIAS AERÓBIAS COMO SUBSTITUTOS DE OOCISTOS DE *CRYPTOSPORIDIUM* EM FILTROS LENTOS

Louise de Miranda Vasconcelos⁽¹⁾

Engenheira Civil pelo Centro Universitário de Brasília. Mestranda em Hidráulica e Saneamento pelo Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos (PTRAH/UNB).

Yovanka Pérez Ginoris⁽²⁾

Doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pelas Universidade Federal do Rio de Janeiro, é coordenadora do curso de graduação em engenharia ambiental da Universidade de Brasília. Atua principalmente nos temas de qualidade da água, água para consumo humano, tecnologias convencionais e simplificadas de tratamento de água.

Endereço⁽¹⁾: EQN 408/409, Anexo SG 12, Asa Norte, Brasília - DF - CEP: 70855-400 - Brasil - Tel: (61) 3107-0940 - e-mail: louisedmv@gmail.com

RESUMO

De acordo com cenário atual mostrado pelo Programa Nacional de Saneamento Rural (2019), há uma necessidade de buscar soluções tecnológicas de tratamento de água que sejam adequadas ao meio socioambiental rural brasileiro. No caso de pesquisas sobre filtração lenta, ainda há desafios quanto ao manuseio de microrganismos patogênicos que podem apresentar riscos a saúde dentre outras adversidades. O propósito desta pesquisa foi avaliar a eficiência de remoção de microesferas fluorescentes e esporos de bactérias aeróbias, como substitutos de oocistos de *Cryptosporidium* com intuito de verificar uma possível aplicação desses agentes no monitoramento de filtros lentos em escala piloto com 2 granulometrias de meio filtrante diferente. O estudo foi conduzido operando 4 filtros lentos em areia (fina e grossa), com uso de manta de poliéster não-tecida, taxa de filtração constante e carga hidráulica variável. A água afluyente, proveniente do lago Paranoá, e os efluentes dos filtros foram caracterizados por parâmetros físico-químicos, além disso para caracterizar coliformes totais e *E.coli* foi utilizado o método Colitag. As microesferas foram adicionadas à água bruta em 2 dias diferentes de operação, uma na fase de amadurecimento e outra na fase de transpasse, concomitantemente durante os picos de contaminação foram feitos o monitoramento dos esporos de bactérias aeróbias (EBA). Os resultados experimentais foram analisados por estatística descritiva e avaliada a normalidade de distribuição. A taxa de filtração (3,0m³/m²dia) empregada, promoveu aumento acelerado da perda de carga nos filtros com meio filtrante de granulometria fina, alcançando a carga hidráulica máxima nos filtros com meio filtrante fino dias 23º e 24º de operação enquanto que nos filtros com granulometria grossa apresentaram melhor resposta hidráulica. Os resultados de turbidez das águas filtradas de todos os filtros se mantiveram abaixo do 1,0 uH máximo permitido pela legislação. O método de colitag usado para quantificação de coliformes totais e *E.coli* trouxe subjetividades em interpretações físico-químicas e microbiológicas nas amostras coletadas. Os resultados de remoção de microesferas puderam sugerir que a fase madura dos filtros durou poucos dias, ao se comparar o período de amadurecimento com o de transpasse, as melhores remoções foram feitas no período de amadurecimento do filtro. Por fim, não foi possível traçar considerações suficientes sobre as retenções de EBA nos filtros lentos e nem como potencial indicador de remoção de oocistos de *Cryptosporidium*.

PALAVRAS-CHAVE: Substitutos de Patógenos, Microesferas fluorescentes, Esporos de Bactérias Aeróbias, Metodologia Colitag, Filtração Lenta, Saneamento Rural, Tratamento de água.

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que 2,1 bilhões de pessoas em todo o mundo não têm serviços de água tratada, em decorrência à falta de água potável, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF). Todos os anos 297 mil crianças com menos de 5 anos morrem devido à diarreia

associada a água e higiene inadequados. Os dados da OMS (2019) mostram que 8 em cada 10 pessoas vivendo em áreas rurais não têm acesso aos serviços de água tratada.

Para pensar soluções para uma realidade, devemos tirá-la da invisibilidade, assim, para justificar a exclusão sanitária das populações que residem no meio rural e colocar o saneamento rural como protagonista, o Plano Nacional de Saneamento Básico, tendo como marcos referenciais os direitos humanos, a promoção da saúde e a erradicação da extrema pobreza, serviu como base para elaboração do Programa Nacional de Saneamento Rural – PNSR (2019).

Para garantir o acesso universal e equitativo à água potável, de acordo com o PNSR (2019), é necessário buscar soluções que se adequem a diferentes realidades encontradas no Brasil – meio urbano, meio rural, comunidade indígena, quilombola e assentamentos - desde que se respeite a diversidade socioambiental e cultural brasileira.

Partindo desta perspectiva, a filtração lenta pode ser considerada uma tecnologia de tratamento de água que se destaca como alternativa para o abastecimento de água em pequenas comunidades e que respeita a diversidade socioambiental. Este tipo de solução tecnológica é considerada de fácil utilização, fácil manutenção, econômica, não requer mão de obra altamente especializada e é eficiente na remoção de patógenos (como por exemplo, cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium*).

Ao realizar pesquisas associadas ao manuseio desses microorganismos patógenos encontra-se desafios, com: riscos à saúde associado ao manuseio de oocistos de *Cryptosporidium*; complexidades da comunidade microbiana em escala real, dificuldades analíticas de detecção em amostras, segurança do processo; adversidades dentro dos laboratórios e principalmente os altos custos de experimentais.

Assim, neste trabalho, foi avaliada em escala piloto, a eficiência de remoção de microesferas fluorescentes e esporos de bactérias aeróbias, como substitutos de oocistos de *Cryptosporidium* com intuito de verificar o potencial de aplicação desses agentes no monitoramento da eficiência em filtros lentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi executado em duas etapas. Na primeira etapa, realizou-se a montagem dos 4 filtros de diferente granulometria da areia, providos de mesma manta. Na etapa 2, experimental, foi avaliada a eficiência da remoção de microesferas fluorescentes e esporos de bactérias aeróbias (EBA) durante o amadurecimento e em meio filtrante maduros, investigou-se análises quantitativas dos parâmetros físicos e químicos (alcalinidade, cor aparente e verdadeira, coliformes totais e *E.coli*, pH, Turbidez) investigados em laboratório e por dados estatísticos.

2.1 ETAPA 1: MONTAGEM DOS FILTROS

Na primeira etapa, a montagem dos 4 filtros lentos foram confeccionados a partir de colunas de acrílico de 133 mm de diâmetros externo, 5 mm de espessura e 1,40 m de comprimento. O meio filtrante de areia teve uma profundidade de 0,50 m. No topo do meio filtrante foi colocado manta sintética não tecida, como camada suporte havia 0,10 m de pedregulho com granulometria na faixa de 1,19 a 5,66 mm.

O sistema de alimentação da filtração, era composto por um reservatório para armazenamento da água bruta, uma bomba de recalque, um reservatório intermediário de água com nível constante, bomba peristáltica com quatro canais para alimentar as quatro colunas de filtração.

O meio filtrante apresentava granulometria diferente em cada par de filtros, nos filtros FLA 1 e FLA 2 o meio filtrante era constituído por areia fina com características $d_{10} = 0,30$ mm, tamanho dos grãos 0,075 – 0,85 mm, coeficiente de uniformidade de 1,93, e porosidade 0,40. Nos filtros FLA 3 e FLA 4 o meio filtrante era categorizado de areia grossa, tinha por características $d_{10} = 0,51$ mm, tamanho dos grãos 0,425 – 2,0 mm, coeficiente de uniformidade de 1,65, e porosidade 0,40 conforme ilustra a Figura 1.

A manta usada nos experimentos era composta por poliéster com porosidade de 91% e área específica de $16005\text{m}^2/\text{m}^3$, esta manta foi escolhida por apresentar os melhores resultados na remoção de coliformes totais, turbidez e microesferas sobre o meio filtrante de areia no trabalho de Almeida (2018).

Antes de iniciar os experimentos de filtração foi efetuado um ensaio com traçador para definir o intervalo de coleta da água bruta e água filtrada, para garantir a representatividade das amostras de água filtrada coletadas. Para tal, os filtros foram alimentados com uma solução salina de NaCl de concentração conhecida e a condutividade da água na saída dos filtros foi monitorada até se verificar a completa substituição da água que estava anteriormente ocupando o filtro pela solução salina. A partir dos resultado de perfil de variação da condutividade, foi definido um tempo de detenção hidráulico de 5h para todos os filtros.

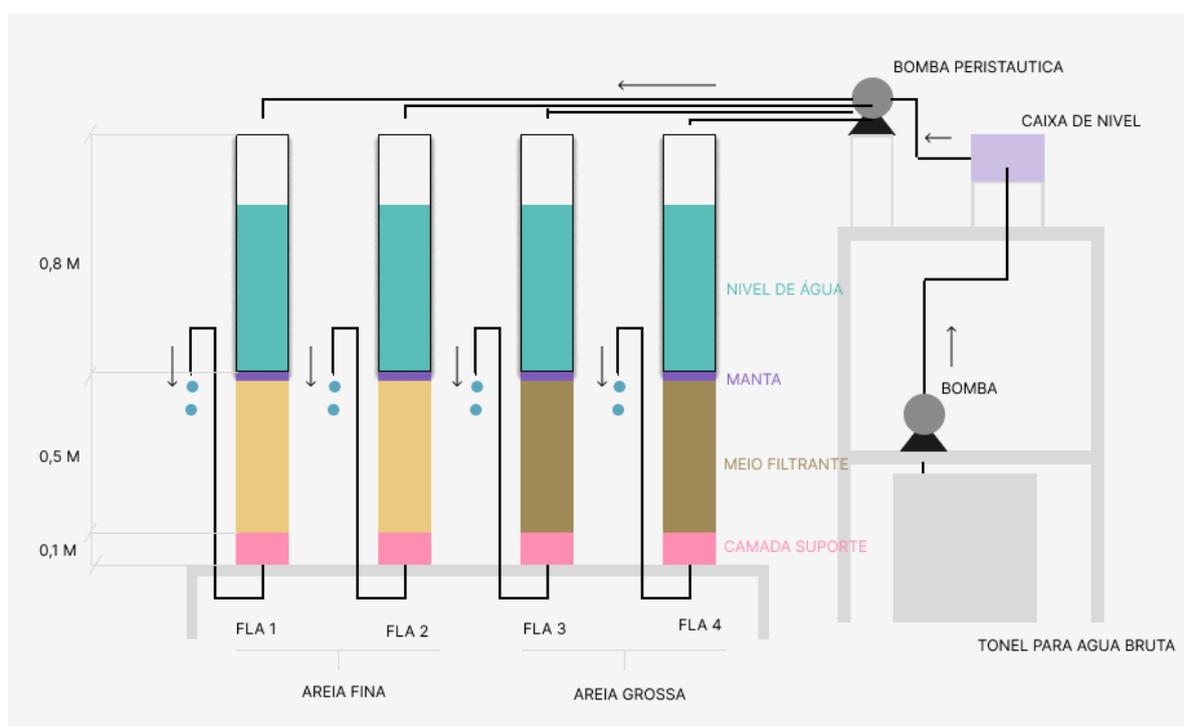


Figura 1: Esquema da instalação piloto de Filtração Lenta na etapa experimental

2.2 ETAPA 2: EXPERIMENTAL

Finalizada a primeira etapa, foi iniciada a operação dos filtros com o intuito de avaliar a eficiência de remoção de microesferas fluorescentes e EBA. Durante a operação dos filtros se fazia monitoramento mediante coleta de amostras da água afluenta e efluente e também através da medição de perda de carga por meio das tomadas piezométricas.

A coleta de água bruta era realizada com frequência de três vezes por semana para alimentação dos filtros. A água afluenta utilizada nos experimentos de filtração foi proveniente do lago Paranoá e era coletada na estação experimental da Biologia da UnB por meio de um sistema de bombeamento. O lago Paranoá está inserido na bacia do rio Paranoá, que pertence a grande bacia do Rio Paraná, e está localizado na região central do Distrito Federal.

Para caracterizar a água bruta foram feitas medições de: alcalinidade, cor aparente, cor verdadeira, turbidez, pH, coliformes totais, *E.coli*. Todos os filtros foram operados de forma contínua, com taxa de filtração constante ($3,0\text{ m/d}$) e nível variável de coluna de água acima do meio filtrante. A escolha da taxa se deu de acordo com os resultados obtidos por Amui e Moruzzi (2016) e Almeida (2018).

A densidade de coliformes totais e *E.coli* foi avaliada na água afluente e efluente dos filtros. As amostras foram analisadas através do método Colitag, através da técnica do substrato cromogênico. De posse dos resultados positivos obtidos nas cartelas o Número Mais Provável de coliformes totais e *E.coli*/100 mL nas amostras analisadas era determinado com auxílio da tabela do método de estimativa de densidade de bactérias 9221 C do nos Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Hunt, Rice 2005).

Para realizar a avaliação da remoção de microesferas fluorescentes foram efetuados 2 picos de alimentação na água bruta com duração de 24h, um durante o amadurecimento (9º dia de operação) e o outro após o amadurecimento do meio filtrante dia 22º dia de operação).

Para tal, a água bruta foi enriquecida com microesferas fluorescentes de poliestireno, como também utilizado por Francisco (2012), Frota (2014) e Pizzolatti (2014). As microesferas são partículas de poliestireno e carboxilato auto fluorescentes, que possuem excitação máxima a 441 nm e emissão máxima a 486 nm, cujo tamanho (4,5 µm) e densidade (1,045 g/mL) similares do oocistos de *Cryptosporidium*.

O preparo da suspensão de microesferas adicionada na água bruta foi realizado por meio adição de uma líquota da suspensão concentrada fornecida pelo fabricante seguido de homogenização, de forma a obter uma concentração de microesferas na água bruta de 10⁵ me/L. Após a preparação da água bruta, eram coletadas amostras para a contagem das microesferas.

Durante os picos de alimentação, o monitoramento das microesferas era feito com a coleta de amostras instantâneas após o tempo de detenção hidráulico de 5h e em amostras compostas de água filtrada ao longo das 24h de operação, correspondente ao pico de alimentação. Em seguida foi contato o arraste de microesferas.

Concomitante durante os picos de alimentação de microesferas, foi realizado coleta de amostras de água bruta e efluente dos filtros para contagem de EBA. As coletas foram realizadas instantâneas após o tempo de detenção hidráulica e no final de 24h após o início do pico de alimentação de microesferas. As análises de EBA foram realizadas em duplicata de acordo com a metodologia descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, método 9218 (APHA; AWWA; WEF, 2005).

Os esporos de bactérias aeróbicas (EBA) tem se mostrado bons indicadores da eficiência do tratamento da água em ciclo completo e exibem potencial uso como indicadores para remoção/inativação de oocistos de *Cryptosporidium* em experimentos com filtração rápida como relatado por Oliveira (2015).

2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Todos os dados experimentais obtidos foram sistematizados usando a estatística descritiva. Além disso, estes resultados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade de sua distribuição. Os dados em que o teste deu positivo foram aplicados testes paramétricos (ANOVA) e os dados que não apresentaram distribuição normal foram analisados usando testes não-paramétricos (Kruskal Wallis).

Para o raciocínio analítico, o conjunto de dados monitorados foram agrupados em 5 categorias: água do lago Paranoá (água bruta), filtro lento nº1 (FLA 1), filtro lento nº 2 (FL2), filtro lento nº 3 (FL3) e filtro lento nº 4 (FL4). Toda a análise estatística, foi realizada através do software “GRaphPAD Prism”, enquanto os gráficos foram confeccionados no Microsoft Excel for Windows 2016.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fase experimental, o FLA 1 operou durante 23 dias, FLA 2 durante 24 dias, enquanto que os filtros FLA3 e FLA 4 foram desligados no 25º dia de operação.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA

As características da água bruta influem de forma bastante significativa na escolha da tecnologia de tratamento, na determinação de parâmetros de projeto, na duração das carreiras de filtração e na qualidade da água

produzida. Os resultados da estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos e biológicos da água afluenta podem ser observados na Tabela 1.

A alcalinidade da água bruta apresentou média de $26,4 \pm 2,1$, normalmente as águas superficiais possuem alcalinidade natural decorrente da presença de carbonatos e bicarbonatos, não representando risco potencial à saúde humana.

Tabela 1 - Parâmetros da qualidade da água do Lago Paranoá durante a Fase experimental

	N*	Média $\pm \sigma^{**}$	Mediana	Faixa	Amplitude	CV***
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	12	$26,4 \pm 2,1$	26,5	23,5 – 30	6,5	8%
Cor Verdadeira (UC)	12	$7,2 \pm 7,2$	4,5	0 – 25	25,0	101%
Cor Aparente (UC)	12	$31,7 \pm 10,9$	29,5	19 – 60	41,0	35%
Coliformes totais (NMP/100mL)	10	$8,2 \times 10^5 \pm 5,9 \times 10^5$	$6,3 \times 10^5$	$1,6 \times 10^4 - 1,6 \times 10^6$	$1,6 \times 10^6$	72%
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	10	$1,2 \times 10^4 \pm 1,8 \times 10^4$	$1,6 \times 10^3$	$1,7 \times 10^2 - 4,6 \times 10^4$	$4,6 \times 10^4$	152%
pH	12	$7,1 \pm 0,7$	7,5	5,7 – 7,6	1,9	10%
COT (mg/L)	10	$5,8 \pm 0,7$	5,9	4,5 – 6,6	2,2	12%
Turbidez (uT)	12	$3,3 \pm 1,3$	3,1	0,7 – 6,0	5,4	40%

N*: Número de amostras analisadas.

σ^{**} : Desvio padrão

CV***: Coeficiente de variação dado pelo coeficiente percentual entre o desvio padrão e a média.

A cor verdadeira oscilou entre 0 e 25 uC com média de $7,2 \pm 7,2$ uC, esta acima do limite de 5,0 uC proposto por Di Bernardo *et al* (1999). Cabe ressaltar que o a filtração lenta apresenta limitação quanto a eficiência de remoção de cor verdadeira em águas afluentes. A cor aparente apresentou média de $31,7 \pm 10,9$ uC.

O valor médio do pH na água bruta foi de 7,1, apresentando baixa variabilidade ao longo da operação dos filtros e próximo a neutralidade. Este valor de pH favorece o desenvolvimento da comunidade microbológica nos filtros.

Em relação a turbidez, os valores variaram de 0,7 a 6,0 uT, com um valor médio de $3,3 \pm 1,3$ uT, permanecendo dentro do limite proposto por Di Bernardo *et al* (1999) que apresentam como limite superior 10 uT.

O valor médio de coliformes totais foi superior a 1.000 NMP/100ml recomendado por Di Bernardo *et al* (1999). Já *E.coli* apresentou densidade média de $1,2 \times 10^4$ NMP/100ml. Estes valores podem estar relacionados ao local de coleta da água bruta que está próximo ao ponto de lançamento do efluente da ETE Brasília Norte.

3.1 PERDA DE CARGA

O crescimento da perda de carga nos filtros representa o acúmulo das impurezas presente da água bruta e o desenvolvimento da atividade biológica nos primeiros centímetros de profundidade do meio filtrante, resultando em resistência a passagem de água através dos grãos de areia dentro do meio e provocando o aumento do nível da coluna de água. A evolução da perda de carga durante a operação dos filtros está representada na Figura 2.

Observa-se na Figura 2 o comportamento similar da perda de carga dos pares de filtros 1-2 e 3-4 nos primeiros 18 dias de operação.

Do 1º até o 13º dia os pares de filtros apresentaram perda de carga praticamente constante variando ± 1 cm, mas a partir do 14º dia a perda de carga aumentou linearmente em todos os filtros de forma similar até o 18º dia. Após o 18º dia, a perda de carga aumentou bruscamente nos dois filtros de areia fina, de modo que o FLA 1 atingiu a carga hidráulica máxima no 23º dia, e o FLA 2 no 24º dia, sendo necessário interromper a operação

de ambos os filtros. Os filtros FLA 3 e FLA 4 tiveram comportamento similares, chegando ao 21º com perda de carga estabilizada, até o fim da operação.

Comparando os resultados ao longo do ensaio (antes do FLA1 e FLA2 atingir a perda de carga máxima), com o de Almeida (2018), que desenvolveu ensaios de filtração empregando os filtros utilizados neste estudo (mesma espessura do meio filtrante, manta de poliéster, $d_{10} = 0,27$ e $d_{10} = 0,51$, água bruta do Lago Paranoá) mas com taxa de filtração menor, de $2,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, no referido estudo a perda de carga se manteve entre 0,1 a 2 cm ao longo dos 28 dias de operação, diferente do comportamento observado neste trabalho que a taxa de filtração ($3,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$) maior provocou um aumento considerável na perda de carga desses filtros lentos.

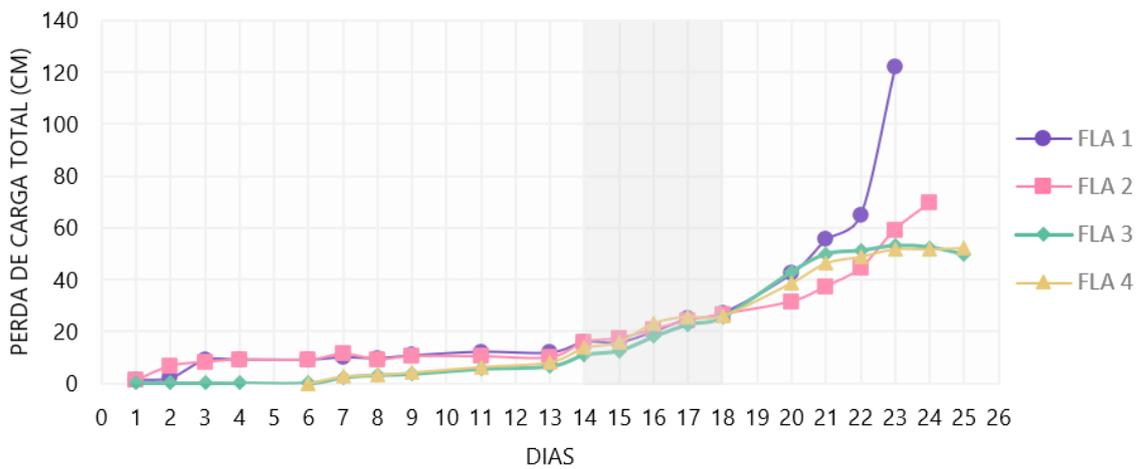


Figura 2: Perda de carga nos filtros lentos durante a fase experimental

Assim, ao analisar somente os resultados de perda de carga podemos sugerir que os filtros FLA 3 e FLA 4 com granulometria (grossa) produziram uma resposta hidráulica melhor com a taxa de filtração maior, não atingindo a perda de carga máxima na operação de 25 dias.

3.2 TURBIDEZ

A turbidez da água bruta é fundamental no desempenho da filtração lenta, pois reflete a concentração de partículas afluentes que influenciam no amadurecimento do filtro, e conseqüentemente, na qualidade da água produzida, além de impactar a duração das carreiras de filtração. Deste modo, os resultados da estatística descritiva dos valores de turbidez do efluente dos filtros encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos valores de turbidez (uT) da água efluente dos filtros durante a Fase experimental

	FLA 1	FLA 2	FLA 3	FLA 4
N*	11	11	12	12
Média ± σ^{**}	0,55 ± 0,13	0,50 ± 0,15	0,54 ± 0,10	0,55 ± 0,11
Mediana	0,54	0,49	0,54	0,54
Faixa	0,39 – 0,75	0,35 – 0,83	0,41 – 0,78	0,42 – 0,75
Amplitude	0,36	0,48	0,37	0,33
CV***	24%	30%	19%	20%

N*: Número de amostras analisadas.

σ^{**} : Desvio padrão

CV***: Coeficiente de variação dado pelo coeficiente percentual entre o desvio padrão e a média.

Os valores de turbidez residual da água produzida pelos filtros apresentaram distribuição normal, portanto ao se aplicar o teste ANOVA verificou-se que não existe diferenças significativas na turbidez da água filtrada produzida por cada filtro. Contudo, a partir dos valores de coeficiente de variação se constata que nos FLA 3 e FLA 4 (granulometria grossa), os residuais de turbidez da água filtrada apresentam uma uniformidade maior.

Almeida (2018) encontrou valores médios de residuais de turbidez do efluente dos filtros (granulometria fina e grossa) de $0,38 \pm 0,13$ e $0,34 \pm 0,14$, respectivamente, que tinham a mesma configuração (manta+granulometria+profundidade do meio filtrante) do nosso estudo, mas operados com taxa de filtração menor, de $2,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$. Ao comparar estes valores com os da Tabela 2, podemos observar que tais residuais de turbidez foram maiores do referido estudo. Provavelmente, em decorrência uso de uma taxa de filtração $3,0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ aplicada neste estudo, diminuiu a eficiência da remoção de turbidez nas águas efluentes dos filtros estudados.

Uma maior taxa de filtração, impacta os mecanismos de transporte e aproximação das partículas presentes na água afluyente sobre os grãos de areia. A Figura 3 apresenta os dados residuais de turbidez na água afluyente e efluente, com zoom para o variação de valores dos residuais nas águas filtradas.

Conforme mostrado na Figura 3 e considerando o limite exposto pela Portaria GM/MS Nº 888/2021 do Ministério da Saúde Anexo 2 (BRASIL,2021) para a turbidez da água efluente dos filtros lentos, $1,0 \text{ uT}$. Podemos sugerir que em 100% das amostras coletadas, os efluentes de todos os filtros permaneceram dentro dessa limitação, apresentando todos os valores das amostras abaixo do valor estipulado pela legislação.

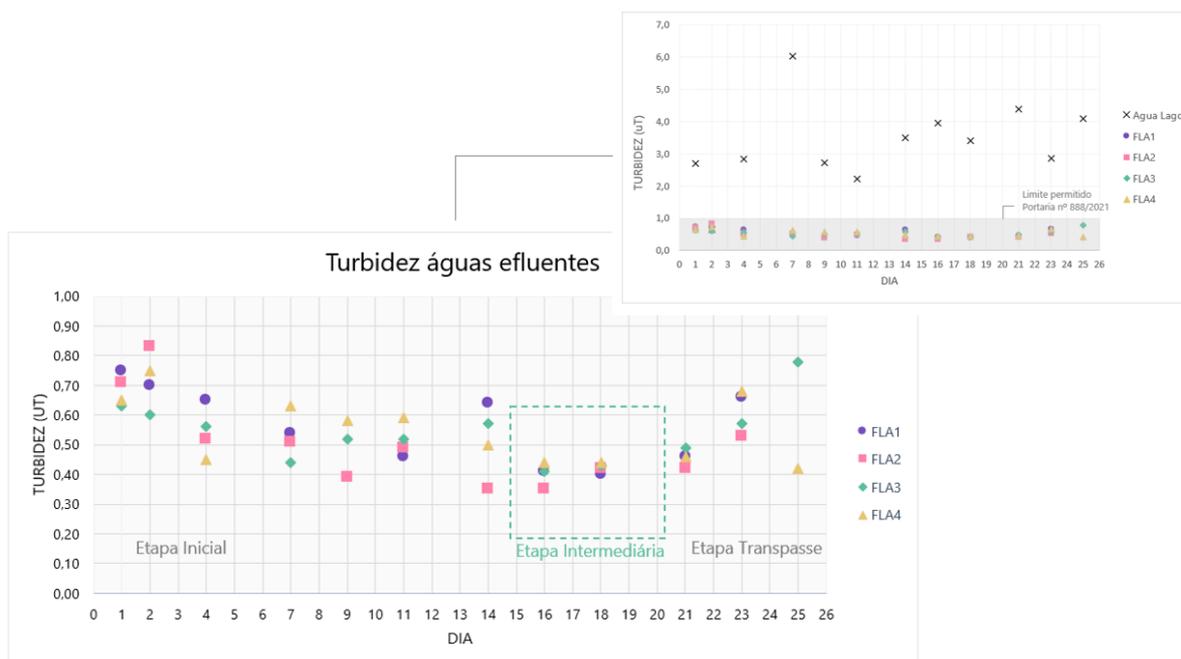


Figura 3: Dados de turbidez na água afluyente e efluente

Na Figura 3, é perceptível ver que os primeiros dias operação dos filtros, etapa inicial, uma tendência decrescente nos valores de turbidez da água filtrada, apesar da turbidez na água bruta se elevar um pouco no 14º dia e refletindo um pequeno aumento nos valores de turbidez nas águas filtradas. Essa tendência decrescente demonstra a fase de amadurecimento do filtro, devido ao desenvolvimento da comunidade biológica no meio filtrante. As autoras Melo (2006) e Almeida (2018) relatam esta tendencia de forma similar em seus estudos.

Verifica-se ainda que a partir do 16º dia até 20º dia de operação, etapa intermediária, os valores de turbidez da água filtrada se mantiveram abaixo de $0,5 \text{ uT}$ para todos os filtros. O que indica que, independente da

granulometria, todos os filtros conseguiram produzir água filtrada com níveis similares de remoção de turbidez. A partir do dia 21º, ocorre transpasse de partículas dos filtros indicado pelo aumento gradual do residual de turbidez nos efluentes até o fim da operação.

3.3 COLIFORMES TOTAIS

A Figura 4 apresenta o perfil de variação da concentração de coliformes totais na água bruta e no efluente dos filtros lentos de areia durante a Fase experimental, os valores que extrapolaram o limite da contagem na tabela de estimativa de densidade de bactérias 9221 C do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2005) estão representados por símbolos sem preenchimento.

Na contagem do número mais provável de coliformes em 100mL da água bruta, a partir do 7º dia todos os valores ultrapassaram o limite superior estipulado pela tabela, ou seja, pode ser que a densidade de coliformes nas amostras tenha sido bem maior do que 10^6 . Em várias amostras de água filtrada dos filtros também extrapolaram a contagem do NMP de coliformes totais. Nota-se principalmente no 7º e 21º dia, que todas as amostras ultrapassaram o limite superior e inferior, respectivamente.

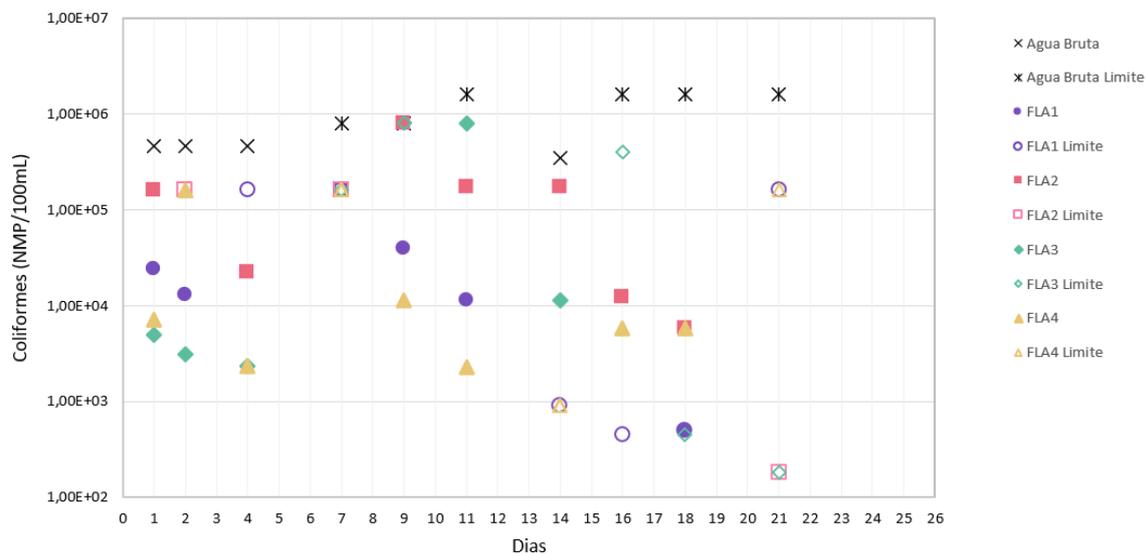


Figura 4 - Perfil de variação da concentração de coliformes totais na água bruta e no efluente dos filtros lentos de areia durante a Fase experimental.

Nos primeiros dias de operação, até o 7º dia, os filtros lentos apresentaram grande variação na remoção de coliformes, pois ainda estava em fase de amadurecimento. Nos efluentes do FLA 3 não houve tendência de estabilização da densidade de coliformes totais em todo período de operação. Já os efluentes do FLA 1 e FLA 4 apresentaram um decréscimo na densidade de coliformes entre o 7º até 14º dia, aumentando após este período. Por último, o efluente do FLA 2 apresenta uma queda efetiva a partir do dia 9 até o 21º dia de operação, mas sem alcançar estabilidade.

A inconsistência nos resultados de densidade de coliformes totais podem ter sido causadas por limitações do método utilizado na quantificação. Primeiro, não foi possível realizar o monitoramento diário dos coliformes totais nos filtros, devido a limitações de material, de forma que as análises eram realizadas 3 vezes na semana, totalizando apenas 10 dias de análise em todo o período de operação. Em segundo lugar, o método permitia a leitura até 48h de incubação, com isso houve um atraso na tomada de decisão quanto aos valores de diluição que deveriam ser usados nas amostras subsequentes.

Além disso, a coloração amarelada que o substrato cromogenico confere também levou a interpretações ambíguas, pois a estimativa do NMP de coliforme depende do número de poços positivos em que se observa o

desenvolvimento da cor amarelada a olho nu na cartela. A Figura 5 mostra que o controle negativo (água de diluição autoclavada com o substrato cromogenico) apresenta tonalidade de amarelo próxima das tonalidades da água filtrada diluída 500x operando no 16º dia de operação.



Figura 5 – Comparação de diluições no dias de operação das águas efluentes

3.4 E. COLI

Em relação a *E. coli*, as concentrações na água filtrada apresentaram grande variação, como ilustrado na Figura 6, os valores que extrapolaram o limite de quantificação do método estão representados por símbolos sem preenchimento.

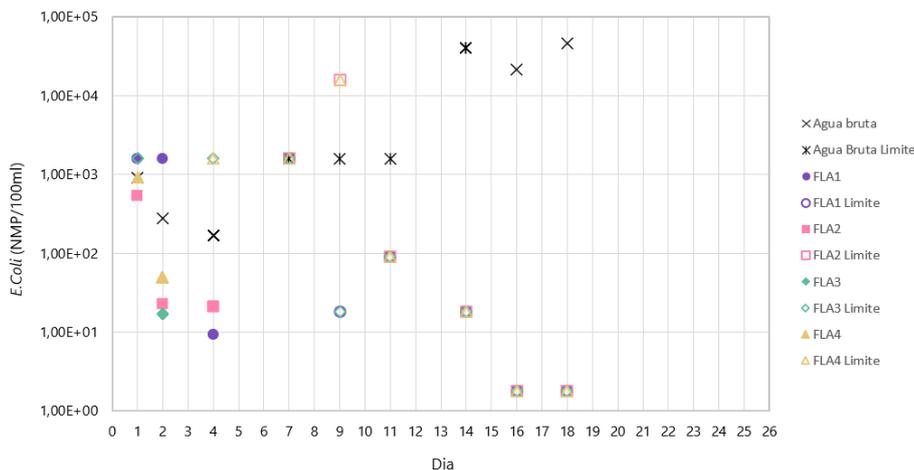


Figura 6 – Densidade de *E. coli* na água bruta e no efluente dos filtros lentos de areia

O número mais provável de *E. coli* em 100mL da água bruta, no 7º até 14º dia todos os valores ultrapassaram o limite superior estipulado pela tabela, ou seja, pode ser que a densidade de *E. coli* na água bruta tenha sido bem maior. Nos efluentes de todos os filtros no 7º dia, a densidades de *E. coli* ultrapassou o limite superior de valores da tabela 9221 C do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2005).

Do dia 1 até 10, o NMP para *E. coli* nas amostras efluentes analisadas, demonstraram certa instabilidade, comportamento característico do período de amadurecimento. Diferente da contagem de coliformes totais, a

contagem de *E.coli* por este método tem mais precisão, devido a identificação dos poços positivos ser feita com auxílio da fluorescência ao incidir a radiação ultravioleta sobre os poços da cartela, eliminando a subjetividade.

Depois do 11º dia verifica-se um decaimento de NMP em todas as amostras de água filtrada e a partir do 16º a densidade de *E.coli* no efluente dos filtros manteve-se abaixo de 1,8 NMP/100mL. Considerando o residual de turbidez estabilizou em seu nível menor no mesmo período, pode-se inferir que os filtros alcançaram o amadurecimento a partir do 16º, produzindo uma água melhor qualidade do ponto de vista microbiológico e físico-químico.

3.5 MICROESFERAS FLUORESCENTES DE POLIESTIRENO

A Figura 7 apresentam os resultados das concentrações de microesferas obtidas na água filtrada na amostra instantânea (6h) e na amostra composta de 24 h depois do pico de alimentação 24 h, a tonalidade mais forte cores demonstra a concentração de microesferas após o tempo de detenção hidráulico, as tonalidades mais claras correspondem as concentrações dessas partículas presentes nos efluentes durante as 24h de duração do pico e das 48h e 72h após o início do pico.

O primeiro pico de alimentação foi realizado no 9º dia de operação, durante o amadurecimento dos filtros. A adição de microesferas no pico 2 foi realizada no 23º dia de operação dos filtros, as concentrações de microesferas fluorescentes na água bruta foram de $7,40 \times 10^5$ me/L e $3,14 \times 10^5$ me/L em cada pico respectivamente.

No pico 1 as remoções de microesferas após 6h de operação foram de 2 a 3 ordens de magnitude em todos os filtros, não se observando um comportamento claro de cada filtro. Estes resultados podem ser atribuídos ao fato que os filtros ainda estavam em fase de amadurecimento, como indicado anteriormente pelas instabilidades nas análises de turbidez, coliforme e *E.coli*.



Figura 7 - Concentração de microesferas na água efluente dos filtros durante os ensaios realizados na Fase experimental 1

No pico 2, já na fase de transpasse dos filtros, a remoção das microesferas depois das 6h de operação de início do pico, a remoção aumentou sendo ligeiramente melhor nos filtros FLA1 e FLA 2, de meio filtrante de granulometria fina ($d_{10} = 0,30$ mm). Durante as 24h de alimentação, a concentração de microesferas aumentou na água filtrada do FLA1 e FLA2 o que sugere que os filtros não conseguiram manter a retenção de microesferas.

O residual de microesferas foi maior nos filtros FLA3 e FLA 4 após as 6h de início do pico 2 em comparação aos filtros FLA1 e FLA2. O FLA 3 segue a mesma tendência de diminuir a retenção no período de 24h de

operação que o FLA1 e FLA2, enquanto que o FLA4 tem uma tendência de aumentar a retenção. Após as 48h e 72h, que correspondem respectivamente 24h e 48h após o encerramento do pico, verifica-se o arraste de microesferas previamente retidas nos filtros FLA3 e FLA4 de granulometria grossa. A liberação de microesferas previamente retidas se intensificam das 24h para as 48h após a interrupção do pico o que pode ser explicado considerando o estado de transpasse dos filtros.

A Tabela 5 apresenta as remoções obtidas para cada filtro durante os ensaios realizados, o cálculo foi realizado tomando por base as concentrações de microesferas total aos filtros durante o pico de contaminação após 6h de operação.

Tabela 3 - Eficiência de remoção de microesferas nos filtros lentos após as 6h do pico de contaminação

	Pico 1		Pico 2	
	Remoção %	Log	Remoção %	Log
FL1	99,81%	2,72	99,82%	2,76
FL2	99,87%	2,89	99,81%	2,72
FL3	99,93%	3,17	99,75%	2,59
FL4	99,84%	2,79	99,62%	2,42

Assim, de acordo com a tabela 3, os dois momentos são de vulnerabilidade dos filtros, o primeiro refletindo o amadurecimento e o segundo após passar amadurecido. No entanto a remoção de microesferas fluorescentes no período de amadurecimento a água produzida pelos filtros tem maior eficiência do que na fase de transpasse.

3.6 ESPOROS DE BACTÉRIAS AERÓBIAS

Durante os picos de contaminação de concentração de microesferas, foi avaliada a remoção de esporos de bactérias aeróbias. A Figura 8 apresentam as concentrações de EBA obtidas na água afluyente e filtrada na amostra instantânea (6h) e na amostra instantânea ao 24 h de alimentação. A densidade de EBA que foram obtiveram maiores valores permitidos pelo método, foram arredondadas para o valor limite e estão indicadas como setas na Figura.



Figura 8 - Concentração de EBA na água efluente dos filtros durante os ensaios realizados na Fase experimental 1

A contagem do Pico 1 foi realizado no 9º dia de operação do filtro, durante o amadurecimento do meio filtrante, a concentração de EBA na água bruta naquele dia foi de $7,50 \times 10^2$ UFC/100 mL. A contagem do Pico 2, realizado no 23º dia de operação dos filtros, a concentração da água bruta apresentou concentrações faixa de $4,55 \times 10^3$ UFC/ 100 mL.

De modo geral, todas as amostras instantâneas da água filtrada coletadas apresentaram densidade de EBA maior do que na água bruta no 9º e 23º dia de operação. Uma possível explicação para este comportamento é que os filtros alimentados continuamente com a água do lago desde o 1º dia de operação liberam esporos previamente retidos. Outra hipótese é que bactérias que colonizam o meio filtrante com capacidade de esporular em condições adversas possam ter contribuído para o aumento de densidade de EBA na água filtrada.

No 9º dia de medição das UFC, pico 1 microesferas, após 6h da alimentação dos filtros, observa-se que o valor das colônias estavam na mesma faixa 10^3 de densidade na água efluente de todos os filtros, independente da granulometria de cada meio filtrante. Nas 24h seguintes a taxa de filtração arrastou o material completamente para saída do filtro elevando as concentrações para mais de 10^4 nas amostras efluentes de FLA1, FLA2 e FLA4.

No 23º dia, pico 2 de microesferas, todos os filtros apresentaram picos de concentrações de EBA, nota-se que os valores UFC 48h e 72h nos filtros FLA 3 e FLA 4 oscilam. Essa oscilação de reter e liberar EBA nos efluentes nos mostra que não é possível tirar conclusões consistentes, fazendo-se necessário estudos futuros com maior frequência de monitoramento em filtros lentos.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado no experimento I, conclui-se que:

Os resultados de perda de carga indicaram que os filtros com granulometria grossa e manta de poliéster não tecida, apresentaram melhor resposta hidráulica com taxa de filtração maior, não atingindo a perda de carga máxima na operação de 25 dias.

Os resultados de turbidez da água filtrada se mantiveram abaixo do valor máximo permitido para efluentes de filtros lentos estabelecidos pelas legislações e que os residuais de turbidez tiveram uma uniformidade maior nos filtros cuja areia apresentava granulometria grossa.

Neste experimento, os resultados de coliformes totais foram influenciados por subjetividades do método Colitag enquanto que os resultados de *E.coli* foram mais consistentes permitindo inferir o período em que os filtros estavam maduros.

Apartir dos análises feitas com resultados de turbidez e *E.coli* foi possível sugerir que o período de amadurecimento do filtro foi do dia 1 até o dia 14, que o período amadurecido foi do dia 15 a 19 e o período de transpasse ocorreu após o dia 20.

A fase amadurecida dos filtros, que se produziu uma água com melhor qualidade durou poucos dias neste experimento. No entanto pelos resultados obtidos analisando as microesferas, os filtros na condição de amadurecimento oferecem menos risco no consumir a água do que no período de transpasse, após as 6h do início da alimentação.

Por fim, os resultados de densidade de EBA, não foram consistentes, sendo necessário o desenvolvimento de estudos futuros com maior frequência de monitoramento do afluente e efluente dos filtros para verificar o comportamento da retenção dessas partículas e potencial como indicador da remoção de oocistos de *Cryptosporidium*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, M. C. (2018). **Avaliação do Uso de Mantas Sintéticas Não Tecidas e Areia Grossa na Filtração Lenta em Escala Domiciliar** – Estudo Comparativo. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM 210/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.
2. Amui, C. R. e Moruzzi, R. M. C. M.(2016). **Desenvolvimento e avaliação de protótipos de filtro lento para tratamento de água em domicílios rurais**. Monografia de Projeto Final de Graduação. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 97f.
3. Brasil. (2021). “Portaria GSM/MS 888/2021, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Diário Oficial da União de 28.09.2017.
4. Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural** – Brasília, Funasa, 2019
5. DI BERNARDO, L. BRANDÃO, C. C. S., HELLER, L. **Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. Rio de Janeiro : ABES/PROSAB, 1999
6. Frota, Y. F. (2014). **Avaliação da influência do tempo de operação na remoção de microesferas de poliestireno por filtração lenta**. Monografia de Projeto Final de Graduação. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 77p.
7. Hunt HE, Rice EW, coordinators. **Microbiological examinations**. In: Standard methods for the examination of water & wastewater, 21ª ed. Washington: APHA; 2005. Part 9000, p. 9-1 – 9-169
8. Melo, A. E. S. (2006). **Avaliação da filtração lenta na remoção de células de *Cylindrospermopsis raciborskii* e saxitoxinas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 178p.
9. Oliveira, K. C. (2015). **Avaliação de esporos de bactérias aeróbias como variável indicadora da eficiência da remoção de protozoários no tratamento de água em ciclo completo**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG, 2015.
10. World Health Organization & United Nations Children's Fund (UNICEF). (2019). **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities**. World Health Organization. Disponível em < <https://apps.who.int/iris/handle/10665/329370>>. Acessado em 26 de agos de 2023.