

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROJETO E DAS CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA NO COMPORTAMENTO DE FILTROS LENTOS DE AREIA

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS AND RAW WATER CHARACTERISTICS ON THE PERFORMANCE OF SLOW SAND FILTRATION.

NEY ALBERT MURTHA

Engenheiro Civil, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Engenheiro da Secretaria Nacional de Recursos Hídricos.

LÉO HELLER

Engenheiro Civil, Doutor em Epidemiologia, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais

Recebido: 26/12/02 Aceito: 10/06/03

RESUMO

Este trabalho resulta de experimento conduzido em escala piloto com filtros lentos de areia, testando diferentes taxas de filtração e dois sentidos de fluxo. Os resultados indicaram que (i) a filtração lenta apresenta excelente desempenho na remoção de *Escherichia coli*; (ii) a remoção de coliformes totais atinge de 2 a 3 log; (iii) a remoção mediana de cor verdadeira variou entre 35% e 52%, (iv) a turbidez efluente mostrou-se consistentemente inferior a 2 UNT, com valor médio inferior a 1 UNT; (v) a remoção de impurezas e bactérias ocorre predominantemente nos 30 centímetros iniciais do leito filtrante; (vi) o filtro lento ascendente pode trabalhar por períodos superiores a 3 meses, sem significativa perda de carga ou deterioração da qualidade da água tratada, sendo conveniente que se prossigam pesquisas sobre essa tecnologia de tratamento. A filtração lenta apresenta, para as variáveis avaliadas, indicadores de eficiência que a credenciam como alternativa segura de potabilização da água.

PALAVRAS-CHAVE: Filtração, filtro lento de areia, filtração ascendente, tratamento de água, turbidez, bactérias

ABSTRACT

This work results of pilot scale experiments led with slow sand filters, operating with different filtration rates and two different flow directions. The results indicate: (i) the slow sand filtration presents excellent performance for Escherichia coli removal, (ii) total coliforms removal reaches from 2 to 3-log; (iii) the median removal of true color ranged 35% to 52%; (iv) the effluent turbidity was consistently below 2 NTU, with an average below 1 NTU; (v) the solids and bacterial removal occurred on the first 30 cm of the filter bed; (vi) the upflow filter can work for more than 3 months, without significant head loss or deterioration of treated water quality, indicating the convenience of continuing researches about the process. Slow sand filtration shows high efficiency, regarding the studied water quality indicators, supporting its use as a reliable solution for drinking water treatment.

KEYWORDS: Filtration, slow sand filter, upflow filters, water treatment, turbidity, bacteria

INTRODUÇÃO

Apesar de haver registros *hindus* de técnicas de tratamento de água datados de 4.000 a.C., é largamente reconhecido que os últimos dois séculos foram os que determinaram os mais significativos avanços nesta área (Hall & Dietrich, 2000). A preocupação original com aspectos estéticos como indicadores da qualidade da água foi respondida, no início do século XIX, com avanços nas técnicas de filtração que resultaram no surgimento da filtração lenta.

A filtração lenta em areia, estabelecida a partir da analogia com a percolação

natural das águas através do solo, originou-se na Grã-Bretanha e consiste de leito de areia suportado por camada de seixos rolados e sistema de drenagem. Por ser um processo de purificação extremamente simples e eficiente, difundiu-se muito rapidamente pela Europa e América. Entretanto, sua expansão foi freada pelo desenvolvimento de outras técnicas de tratamento e pela deterioração da qualidade da água dos mananciais, já que tem a sua aplicabilidade limitada pelas características físico-químicas das águas brutas.

Ainda na segunda metade do século XIX, foram adotadas unidades com coagulação e filtração rápida. Também

nesta época, o desenvolvimento da microbiologia resultou em avanços na área da desinfecção, completando o conjunto de operações de tratamento que praticamente tornou-se hegemônico no meio técnico ao longo do século XX, em sistemas que objetiva a remoção de turbidez e bactérias.

A filtração lenta em areia tem sido indicada pela literatura especializada como alternativa de largo potencial de aplicabilidade, especialmente em pequenas comunidades de países em desenvolvimento. São atribuídas a esta técnica características como facilidade operacional, baixos custos de implantação e operação e gran-

de eficiência na remoção de sólidos e organismos patogênicos. A Figura 1 ilustra uma unidade.

Apesar dos registros de sua utilização tanto em países em desenvolvimento, como Colômbia e Índia, quanto em países desenvolvidos, como Holanda, Inglaterra e Estados Unidos, e apesar das condições climatológicas favoráveis e ainda de sua adequação à realidade sócio-econômica do país, paradoxalmente a técnica de filtração lenta no Brasil tem sido preterida em relação aos processos convencionais de tratamento. Nas últimas três décadas, mesmo que o processo pudesse constituir solução apropriada em diversas aplicações no país, especialmente em comunidades menores onde o manancial se manteve razoavelmente preservado, a substituição tecnológica reprimiu seu emprego no país, resultando, além da implantação de soluções menos adequadas, em prejuízo para o próprio desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia, em termos nacionais (Di Bernardo, Brandão, Heller, 1999).

Especial interesse pela filtração lenta foi suscitado nos Estados Unidos com as revisões das normas para tratamento de águas superficiais e de qualidade da água para consumo humano, em vista da preocupação com a remoção de cistos de *Giardia* e de oocistos de *Cryptosporidium*. Em nível nacional, a adoção do processo pode ter obtido um impulso com a edição da Portaria 1469/2000 do Ministério da Saúde, que: (i) determina a necessidade do processo de filtração para águas oriundas de mananciais superficiais des-

tinadas ao consumo humano; (ii) define um padrão de turbidez mais tolerante para águas tratadas pela filtração lenta (2 UT em 95% das amostras) do que para processos com filtração rápida (1 UT em 95% das amostras); (iii) recomenda a identificação de cistos de *Giardia* e de oocistos de *Cryptosporidium*, visando uma meta de ausência destes microrganismos. Observa-se que, de certa forma, há um implícito reconhecimento da eficiência microbiológica do processo.

Em todo o mundo tem se renovado o interesse pelo potencial de utilização do processo, especialmente para pequenas comunidades rurais, ainda que seja uma técnica também adotada como processo de tratamento em grandes cidades européias (Di Bernardo, Brandão, Heller, 1999). Há que se ressaltar que a possibilidade de supressão de organismos patogênicos por meios naturais e a simplicidade operacional contribuem para a sustentabilidade de pequenos sistemas e compatibilização com princípios naturalistas.

Dentre as variantes dos filtros lentos, podem-se citar os filtros lentos de fluxo descendente - ou convencionais -, os filtros lentos de fluxo ascendente (Figura 2), e os filtros lentos dinâmicos, este em geral utilizado como uma etapa da filtração em múltipla etapa, antecedendo os pré-filtros, que por sua vez antecedem os filtros lentos (Di Bernardo, Brandão, Heller, 1999). No presente trabalho é avaliado somente o desempenho dos filtros lentos convencionais e dos ascendentes.

O filtro lento de fluxo ascendente,

originado em Greenock, Escócia (Grinplastch, 1972), tem sido utilizado naquele país, especialmente após a Segunda Guerra Mundial. Consiste em um tanque em que são dispostas camadas de brita fina e areia, no qual a água é introduzida através de drenos e ascende até a parte superior, onde é coletada (Valencia, 1981). Nesta modalidade, há um predomínio de mecanismos de aderência e transporte sobre os biológicos (Costa, 1980).

Foi desenvolvido a partir da combinação dos princípios da pré-filtração no leito de pedregulho e da filtração ascendente em areia, havendo registros de bons resultados, notadamente na remoção bacteriana. As taxas de filtração e granulometria do meio filtrante são similares às do filtro lento convencional. A espessura do leito, no entanto, pode chegar até 0,70m, pelo fato de sua limpeza ser feita por descarga de fundo, diferentemente da raspagem no convencional.

Esta modalidade de filtração não conseguiu se disseminar como a modalidade convencional, resultando numa exiguidade da literatura técnica e na prevalência de algumas dúvidas quanto a aspectos operacionais. Segundo Valencia (1981), "estudos mais complexos são necessários sobre esses tipos de unidades para poder avaliar de melhor forma seu comportamento". Ressalte-se a necessidade de melhor avaliação sobre o comportamento do leito filtrante após ser submetido a diversas limpezas por descarga de fundo.

O atual pouco uso dos filtros lentos de fluxo ascendente, no entanto, ocorreu

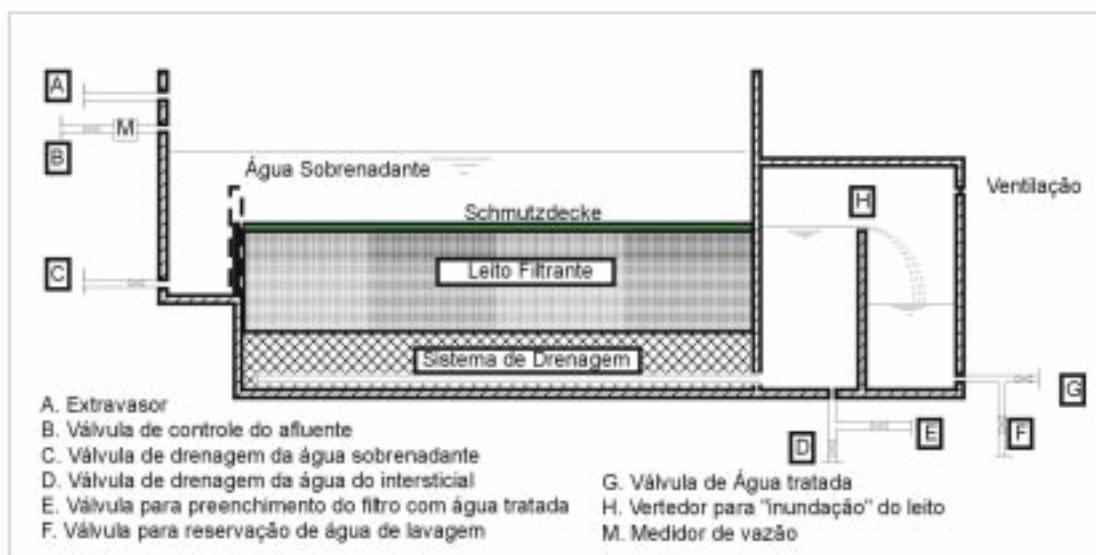


Figura 1 - Filtro lento convencional (adaptado de Pyper & Logsdon, 1991)

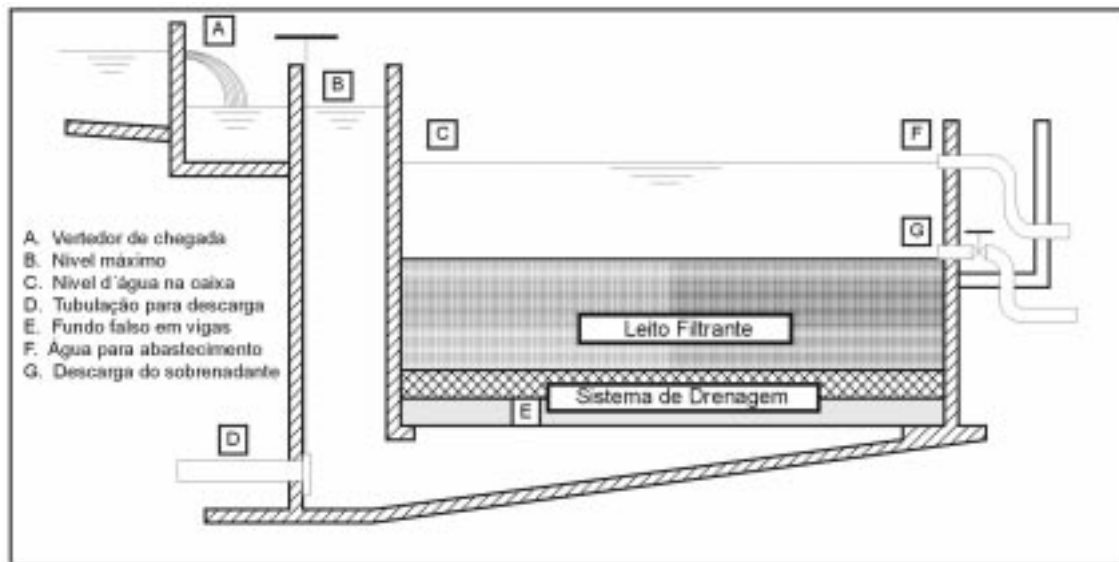


Figura 2 - Filtro lento de fluxo ascendente (adaptado de Valencia, 1981)

sem que tivessem sido divulgadas suficientes e consistentes análises sobre sua inviabilidade. O presente trabalho não tem a pretensão de ser conclusivo em relação a esta questão, mas busca fomentar a discussão, à luz de dados experimentais, ainda que limitados, e referências da literatura especializada.

O experimento, conduzido no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, entre outubro de 1997 e fevereiro de 1998, objetivou, através da análise do desempenho de filtros piloto de fluxo descendente e ascendente, avaliar padrões de comportamento dessas modalidades de filtração, em relação a indicadores físico-químicos e bacteriológicos, duração de carreira e mecanismos de purificação, discutindo criticamente as suas vantagens e limitações.

METODOLOGIA

Foram utilizadas no experimento quatro unidades piloto, sendo três delas descendentes e uma ascendente, doravante denominados Filtros 1, 2, 3 e 4, que foram operados com taxas de filtração iguais a 7,2; 4,7; 2,3 e 2,3 m³/m².dia, respectivamente. A Figura 3 ilustra o esquema de funcionamento do aparato experimental utilizado.

A camada filtrante teve espessura de 0,75 m, diâmetro efetivo igual a 0,25 mm e coeficiente de desuniformidade igual a 2,4. Os filtros piloto foram construídos em acrílico, sendo o diâmetro interno igual a

200 mm, com orifícios laterais ao longo do leito filtrante para amostragens e leituras piezométricas, conforme ilustra a Figura 4.

A água bruta era captada da rede de distribuição pública do município de Belo Horizonte, sendo removido seu clo-ro residual por meio de unidades de filtração em carvão ativado, com monitoramento regular. Na água decolorada, eram dosados esgotos sanitários, provindos do interceptor do Ribeirão Arrudas, para representar bactérias, e argila e infusão de folhas de mate, para representar respectivamente a presença de sólidos suspensos e dissolvidos. Antes de ser recalçada até os filtros, a água bruta passava por uma caixa de retenção de sólidos sedimentáveis, para impedir que sólidos de largas dimensões afluíssem aos filtros, simulando assim, com mais propriedade, as águas provenientes de mananciais superficiais.

O programa de monitoramento experimental compreendeu a coleta de amostras de afluentes e efluentes a cada dois dias, procedendo-se à análise de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, E. coli, coliformes totais, pH e temperatura. Também a cada dois dias era efetuada a leitura piezométrica dos filtros. Ao longo do leito filtrante as análises foram efetuadas semanalmente, monitorando turbidez, cor aparente, E. coli e coliformes totais.

RESULTADOS

A seguir são apresentados os principais resultados do experimento, segundo os parâmetros analisados, o qual, de for-

ma geral, possibilitou avaliar de forma comparativa e muito abrangente o desempenho das instalações.

Turbidez

A eficiência da filtração lenta na remoção da turbidez foi avaliada considerando variáveis como turbidez afluente, taxas de filtração, duração da carreira, profundidade do leito filtrante, do sentido de fluxo e, mais especificamente para o filtro ascendente, redução da turbidez na camada suporte.

O resultado global pode ser considerado satisfatório, sendo a performance do filtro ascendente superior à do filtro 3 e inferior à dos demais filtros descendentes, conforme pode-se visualizar na Figura 5.

Os histogramas relativos aos valores da turbidez efluente indicam a predominância de valores entre 0,5 e 1,0 UNT para os filtros 1, 2 e 4 e entre 1,0 e 1,5 UNT para o Filtro 3, nesse aspecto caracterizando um pior desempenho em relação aos demais filtros.

A remoção de turbidez ocorre predominantemente nos 10 centímetros iniciais do leito filtrante, onde se concentram os mecanismos de retenção de sólidos em suspensão. Observa-se da Figura 6 que a turbidez para os filtros descendentes (F1) chega a valores inferiores a 0,5 UNT já a 10 cm da superfície, oscilando um pouco até o final do leito. O comportamento do Filtro 1 é representativo dos demais filtros descendentes.

Também no filtro ascendente pode-se observar que a remoção de

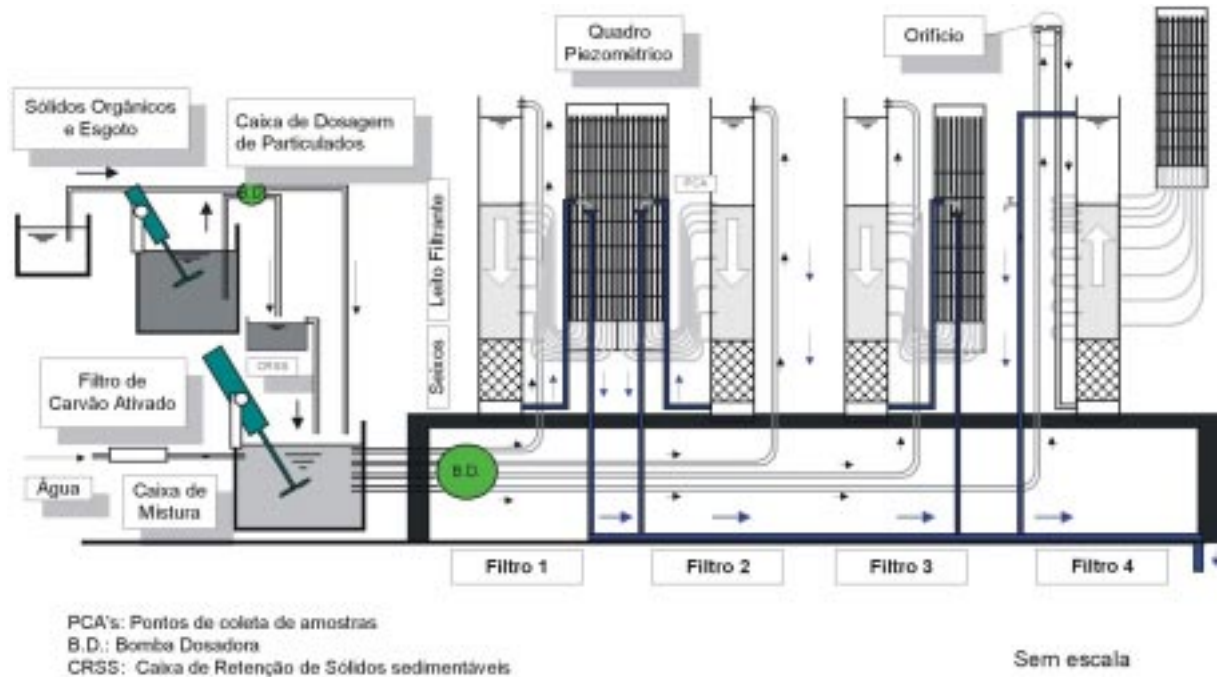


Figura 3 Instalações experimentais para filtração lenta (Murtha, 1998)

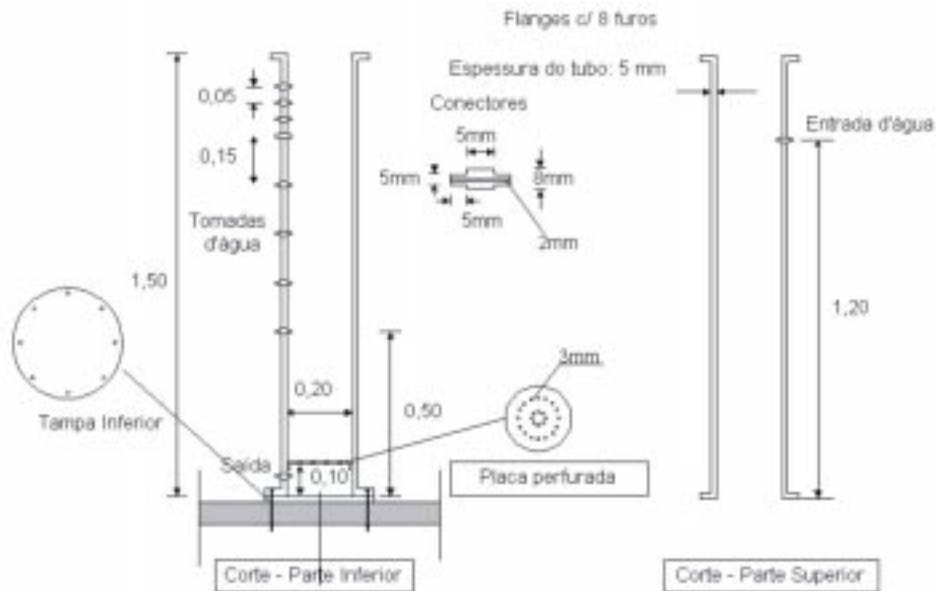


Figura 4 - Corte esquemático de um filtro piloto (Murtha, 1998)

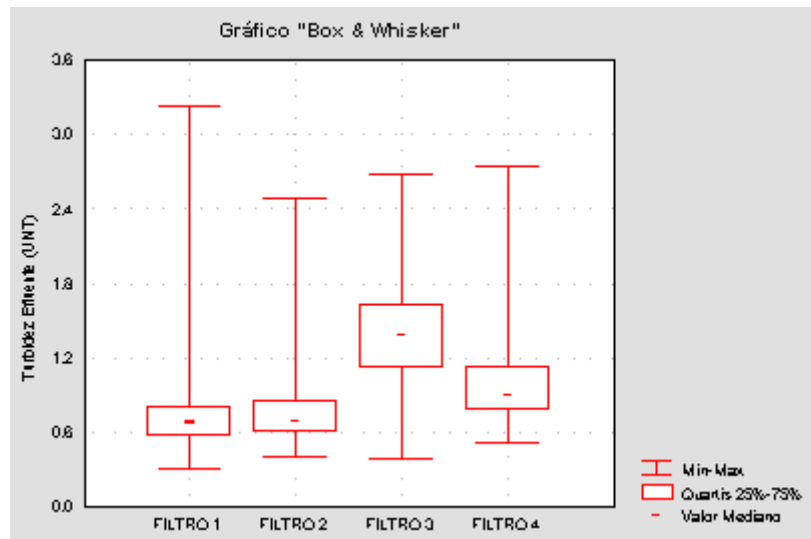


Figura 5 - Turbidez efluente dos filtros piloto

turbidez ocorre até os 15 cm iniciais da camada filtrante, sendo bastante pronunciada a remoção na camada suporte. Nota-se ainda que a turbidez já chega ao leito filtrante (altura 0) com valor próximo à 0,5 UNT. A camada suporte, dessa forma cumpre uma função similar à de um pré-filtro de fluxo ascendente. Isto confere ao filtro de fluxo ascendente uma ótima capacidade de amortecimento de picos de turbidez, funcionando ininterruptamente por mais de três meses, sem perda de carga e deterioração da qualidade do efluente significativas.

Bellamy et al. (1985a) relatam um sensível decaimento dos valores de turbidez da água filtrada à medida que se processa o amadurecimento dos filtros. Esta tendência confirmou-se nas análises da variação da turbidez efluente com a duração das carreiras. A Figura 7 ilustra esta tendência para o Filtro 2. O decaimento da turbidez é nítido ao longo das carreiras, o que pode ser explicado pela formação de uma camada de sólidos com reduzido diâmetro, além de um biofilme, na superfície superior da camada filtrante, que por sua vez incrementa a remoção dos sólidos suspensos.

A pesquisa avaliou ainda uma hipotética relação entre os valores de turbidez afluyente e efluente. Os resultados foram submetidos a análises de *qui quadrado* (teste de Yates corrigido), e demonstraram não haver significativa correlação entre turbidez afluyente e efluente. Elevações, mesmo que bruscas, de turbidez afluyente não acarretaram variações na qualidade do efluente, sugerindo

de uma expressiva capacidade de amortecimento do processo.

A Figura 8 retrata o processo de limpeza do leito filtrante, com a remoção do "schmutzdecke", na qual pode-se constatar a natureza delgada desta camada. O monitoramento da perda de carga nos filtros indicou que ela ocorre predominantemente nos 5 cm iniciais do leito filtrante, chegando a responder por 95% da perda de carga total no final das carreiras de filtração.

Cor aparente

A variação da cor aparente em relação à profundidade do leito filtrante apresentou comportamento análogo ao verificado para turbidez, tendo sido observado um decaimento rápido de seus valores até os 15 cm iniciais do leito filtrante, a partir de onde apenas pequenas oscilações foram verificadas. Em relação ao filtro ascendente, notou-se que a redução de cor aparente ocorre predominantemente no leito suporte.

Nos gráficos da Figura 9, pode-se observar que o comportamento dos filtros piloto na remoção da cor aparente foi bastante similar. Os testes estatísticos de regressão linear múltipla não indicaram significativa correlação entre taxa de filtração e eficiência; entre sentido de fluxo e eficiência, e entre cor aparente afluyente e efluente.

Os resultados indicam uma eficiência de aproximadamente 45% para a faixa de cor aparente afluyente inferior a 30 PtCo, faixa de interesse para a filtração lenta sem pré-tratamento.

Cor verdadeira

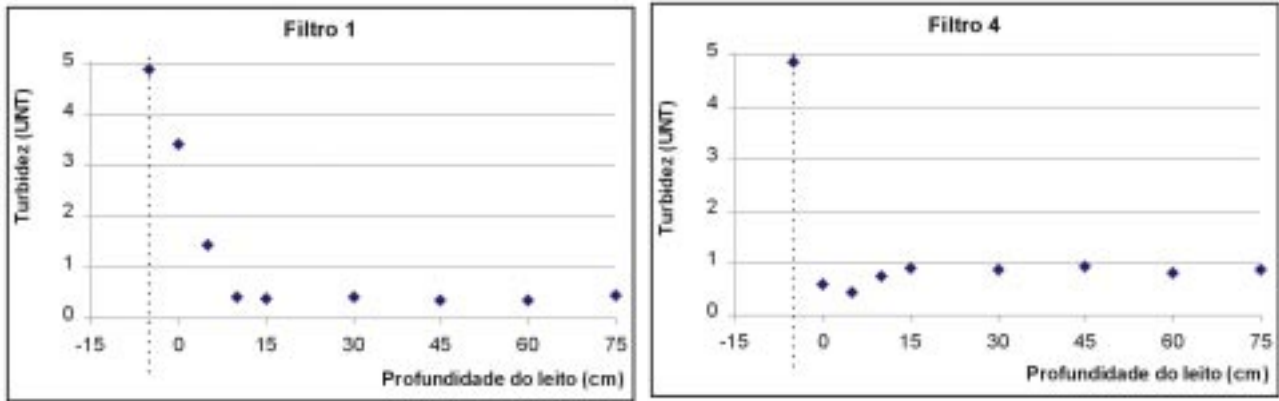
A Figura 10 apresenta os valores de cor verdadeira afluyente e efluente e sugere uma eficiência superior para os filtros 3 e 4, que operaram com menores taxas e mais longas carreiras de filtração. Percebem-se valores mais reduzidos em relação às medianas e uma maior homogeneidade dos resultados, vez que os quartis intermediários compreenderam faixas menos amplas que nos demais filtros.

A análise dos dados relativos à remoção percentual de cor verdadeira indicou que as remoções médias para os filtros-piloto variaram de 28% a 41%, bastante coerentes com os dados apresentados pela literatura especializada.

A eficiência na remoção de cor verdadeira não parece variar significativamente com os níveis afluyentes, guardando uma certa proporção entre os níveis afluyente e efluente. Análises gráficas indicaram a existência de uma relação entre cor verdadeira afluyente e efluente, sugerindo pouca oscilação na eficiência dos filtros, independentemente da cor verdadeira da água bruta. Análises de correlação entre os valores do afluyente e do efluente indicaram $p < 0,05$ e $r = 0,933$, evidenciando a proporcionalidade entre os valores.

Coliformes totais

Avaliando a remoção de coliformes por meio da Tabela 1, verifica-se que tanto em relação à média quanto em relação à mediana, o Filtro 3 apresentou uma



Obs. F1: Descendentes Ponto 0 = interface entre a camada sobrenadante e o leito filtrante
 F4: Ascendente Ponto 0 = interface entre a camada suporte e o leito filtrante

Figura 6 - Variação da turbidez média em relação a profundidade do leito filtrante

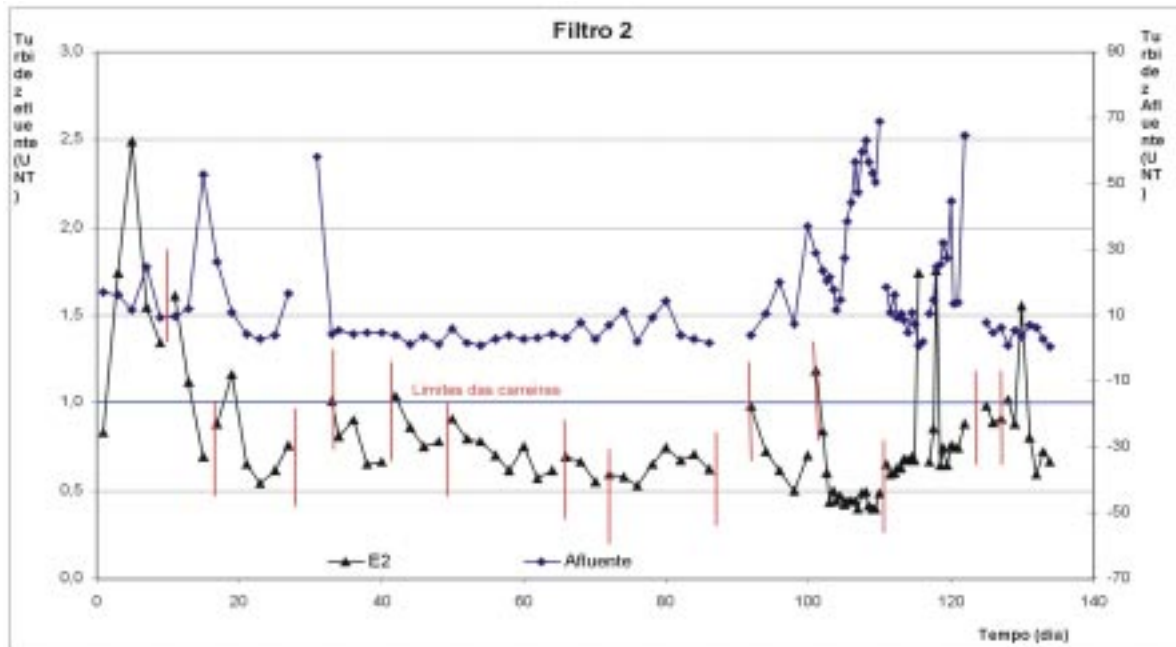


Figura 7 - Variação da turbidez afluyente e efluente do filtro 2 ao longo do experimento



Figura 8 - Filtros-piloto durante e após a limpeza - Vista superior

eficiência superior à dos demais. Esta melhor performance deve-se provavelmente à ação do "schmutzdecke", vez que, dada sua baixa taxa de aplicação, a duração de suas carreiras foi maior, proporcionando maior maturação do leito, sendo que no filtro ascendente não há formação de um biofilme no topo do leito. Conforme se pode inferir dos dados dos filtros 1 e 2, não se verifica significativa relação entre eficiência na remoção de bactérias e taxas de filtração, como relatado por alguns autores.

Observa-se que a mediana das remoções encontra-se entre 2 e 3 log para todos os filtros, e que o filtro ascendente (4) apresentou uma maior homogeneidade de dados, que pode ser verificada através do seu desvio padrão inferior aos demais. Esta maior homogeneidade pode ser justificada pela ausência de perturbações sucessivas oriundas das raspagens nos filtros de fluxo convencional ou pela mais longa carreira de filtração, o que contribuiria para atenuar a variabilidade dos dados.

A Figura 11 reúne os resultados do monitoramento da variação da remoção de coliformes totais com a profundidade do leito filtrante, na qual observam-se decaimentos significativos na contagem de bactérias nas camadas mais superficiais dos filtros descendentes, onde predominam os processos biológicos de remoção. A remoção ocorre predominantemente nos 30 centímetros iniciais para todos os filtros, indicando que além dos mecanismos biológicos superficiais atuantes nos filtros, são também significativos mecanismos de natureza física e biológica de remoção bacteriológica. Nota-se que, após os 30 centímetros iniciais, ocorrem apenas variações pouco significativas em relação ao desempenho global dos filtros, inferiores a 0,5 % para todos os filtros.

Para o Filtro 4 (ascendente), a eficiência na remoção de coliformes não foi muito inferior à verificada para os demais, mas o decaimento ocorreu predominantemente no leito suporte, variando significativamente somente até os 15 cm iniciais do leito filtrante (Figura 11).

Análises gráficas e estatísticas revelaram ainda que na camada sobrenadante dos filtros convencionais ocorre uma depleção significativa da contagem bacteriológica, chegando ao início da camada filtrante com uma remoção de coliformes totais superior a 90%. Os dados coletados indicam uma relação entre a depleção bacteriológica no sobrenadante com o tempo de detenção hidráulica no

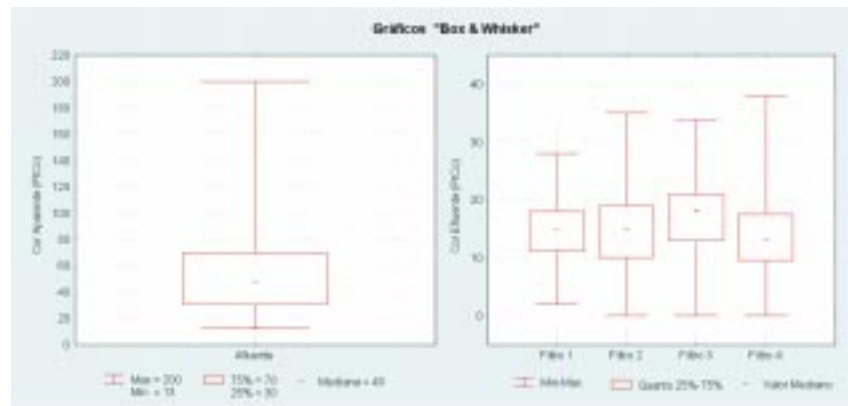


Figura 9 - Distribuição da cor aparente afluenta e efluente

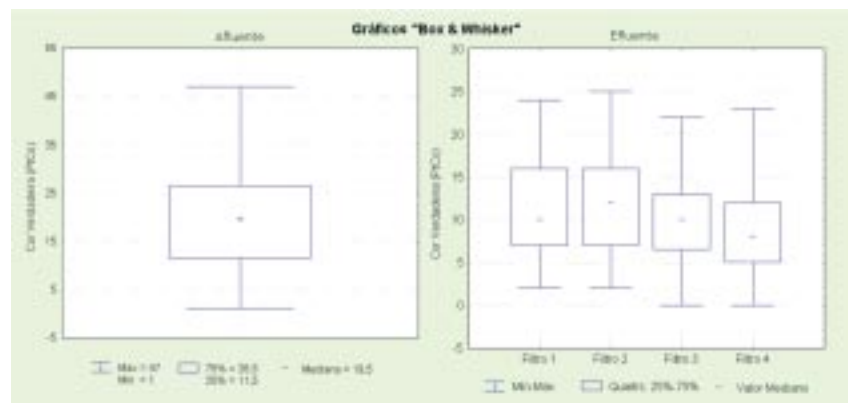


Figura 10 - Cor verdadeira afluenta e efluente dos filtros-piloto

Tabela 1 - Indicadores estatísticos da remoção de coliformes totais (log)

Unidade	Média	Mediana	Quartil Inferior	Quartil Superior	Desvio Padrão
Filtro 1	2,54	2,36	1,45	4,00	1,36
Filtro 2	2,21	2,04	1,38	4,00	1,38
Filtro 3	2,73	2,89	1,84	4,00	1,31
Filtro 4	2,22	2,17	1,73	2,66	1,17

mesmo. Esta redução pode ser possivelmente explicada pela competição biológica no topo da camada filtrante e pela deposição de boa parte dos sólidos suspensos do sobrenadante, aos quais se associam comumente as bactérias.

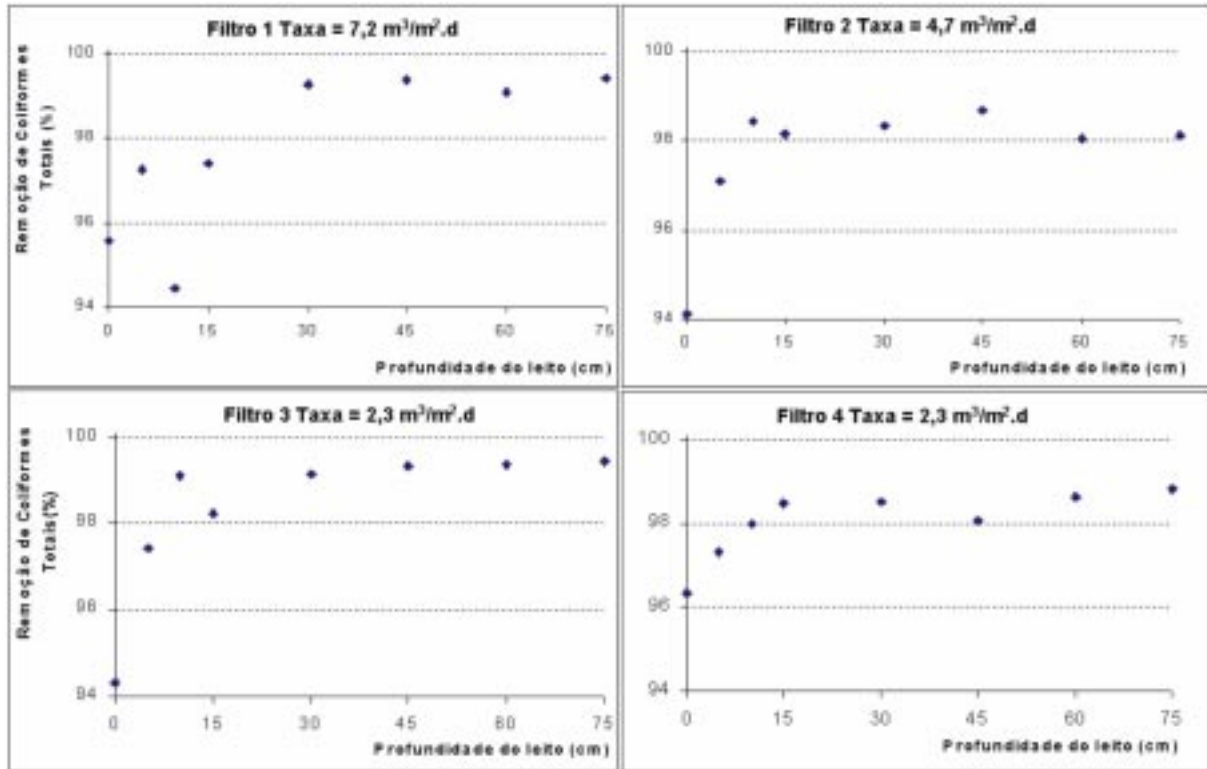
Para o filtro ascendente, este fenômeno ocorre na camada leito suporte que, por meio de mecanismos análogos aos verificados em pré-filtros, promove uma redução nos níveis de coliformes. Cabe ressaltar que, para concentração afluenta acima de 2400 NMP/100 ml, o efluente quase sempre apresentava uma contaminação significativa, demonstrando uma

frágil resistência a picos de contaminação por coliformes.

Na Figura 12, pode-se notar a ocorrência mais acentuada de remoção completa de coliformes no Filtro 3 em relação aos demais filtros, provavelmente devido à maturação do leito, vez que dos filtros de fluxo descendente este apresentou maiores carreiras de filtração.

Escherichia coli

A remoção completa destes microrganismos foi o resultado mais observado no experimento. Pode-se notar que no



Obs. F1, F2, F3: Descendentes Ponto 0 = interface entre a camada sobrenadante e o leito filtrante
 F4: Ascendente Ponto 0 = interface entre a camada suporte e o leito filtrante

Figura 11 - Variação da remoção de coliformes totais com a profundidade do leito filtrante

mínimo 80% dos resultados demonstraram a remoção completa (Tabela 2); no mínimo 89% dos resultados apontaram 1 ou menos colônias por 100 mL e pelo menos 96% dos resultados apontaram uma contagem inferior a 10 NMP/100 mL.

Em relação à remoção de *Escherichia coli* com a profundidade do leito filtrante, pode-se verificar pela Figura 13 que a remoção se dá predominantemente na camada sobrenadante, se estendendo até os primeiros 30 centímetros do leito filtrante, quando a contagem desta bactéria decai até praticamente zero.

A grande remoção no sobrenadante pode ser explicada pelo fato de a *Escherichia coli* não se reproduzir em ambientes aquáticos e pela ação de microrganismos predadores que emergem do leito, especialmente protozoários. Estes resultados confirmam estudos conduzidos por Burman e Lewin (1961) na Inglaterra (Haarhoff & Cleasby, 1991).

DISCUSSÃO

Do ponto de vista da qualidade do efluente, a turbidez afluente não parece ser limitante da tecnologia, no entanto,

pode comprometer as unidades de filtração lenta do ponto de vista da duração da carreira. A pesquisa corrobora, em função disto, que o uso de unidades de tratamento prévio – filtração em múltiplas etapas - por amortecer picos de turbidez é bastante recomendável, evitando o comprometimento temporal das carreiras de filtração.

A turbidez efluente reduz-se com o amadurecimento dos filtros, quando se pronunciam tanto os fenômenos de aderência, com seus complexos processos de retenção, quanto os fenômenos de transporte, já que a acomodação de partículas no topo do meio filtrante concorre para a redução dos espaços intersticiais e para a retenção de sólidos.

A eficiência na remoção de cor aparente é compatível com as citações na literatura, tendo variado de 33% a 95%, dependendo da faixa de cor aparente afluente aos filtros-piloto. Collins et al. (1992) reportam eficiência variando de 40 a 80% e Visscher (1990) considera uma faixa mais ampla, de 30 a 100%.

A remoção percentual de cor verdadeira alcançou valores médios para os fil-

tros-piloto entre 28% e 41%, bastante coerentes com os dados apresentados pela literatura, conforme pode-se verificar na Tabela 3. A eficiência não parece variar significativamente com os níveis da cor verdadeira da água bruta.

Pesquisas conduzidas por Bellamy et al. (1985b), sob clima temperado, concluíram que entre 48 e 97 centímetros, o incremento na remoção de coliformes é da ordem de 2%. Seelaus et al. (1986) reforçam a tese de que a zona de redução bacteriana localiza-se imediatamente sob superfície do filtro, relatando uma remoção de coliformes superior a 97% para filtros maduros, até uma profundidade de 20 centímetros.

Os dados obtidos apontam para uma redução de coliformes bastante pronunciada até os 30 cm iniciais do leito filtrante, a partir de onde apenas pequenas variações ocorrem, resultados devidamente respaldados pelas pesquisas citadas. Essa conclusão é particularmente importante, pois pode subsidiar recomendações no sentido de se reduzir a camada filtrante útil no projeto de filtros lentos.

Não foi verificada, para os filtros 1 e 2, correlação entre as taxas de filtração e a

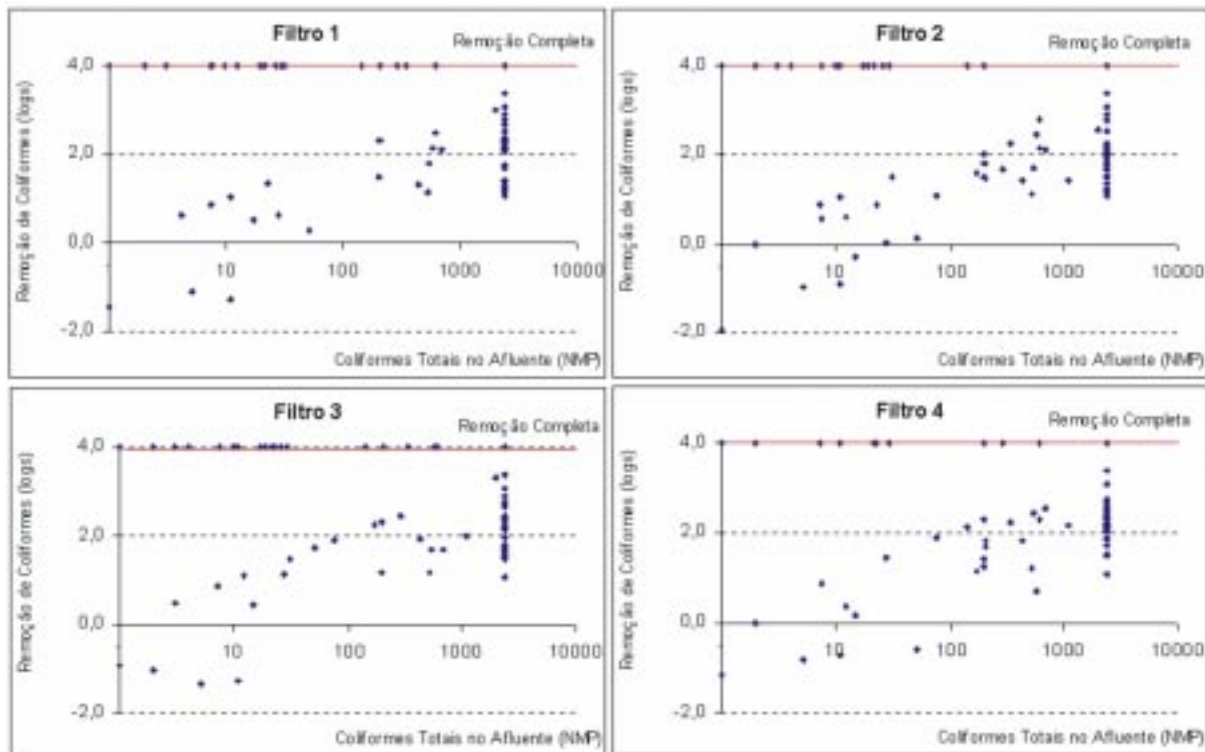


Figura 12 - Variação da eficiência em relação à concentração de coliformes na água bruta

Tabela 2 - Distribuição da frequência da contagem de *Escherichia coli* efluente dos filtros-piloto

Contagem efluente(NMP/100 mL)	Número de Observações			
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
0	90%	86%	80%	85%
≤ 1	96%	96%	96%	89%
≤ 10	100%	98%	100%	96%

eficiência bacteriológica, provavelmente porque essa eficiência está mais relacionada ao tempo de maturação do filtro que às taxas de filtração.

Há que se registrar ainda o bom desempenho do filtro ascendente, uma vez que este não conta com a formação do *schmutzdecke* superficial. O desempenho do filtro ascendente ao longo da carreira caracterizou-se por uma grande dispersão de dados no início da operação, estabilizando-se em uma faixa mais homogênea após este período.

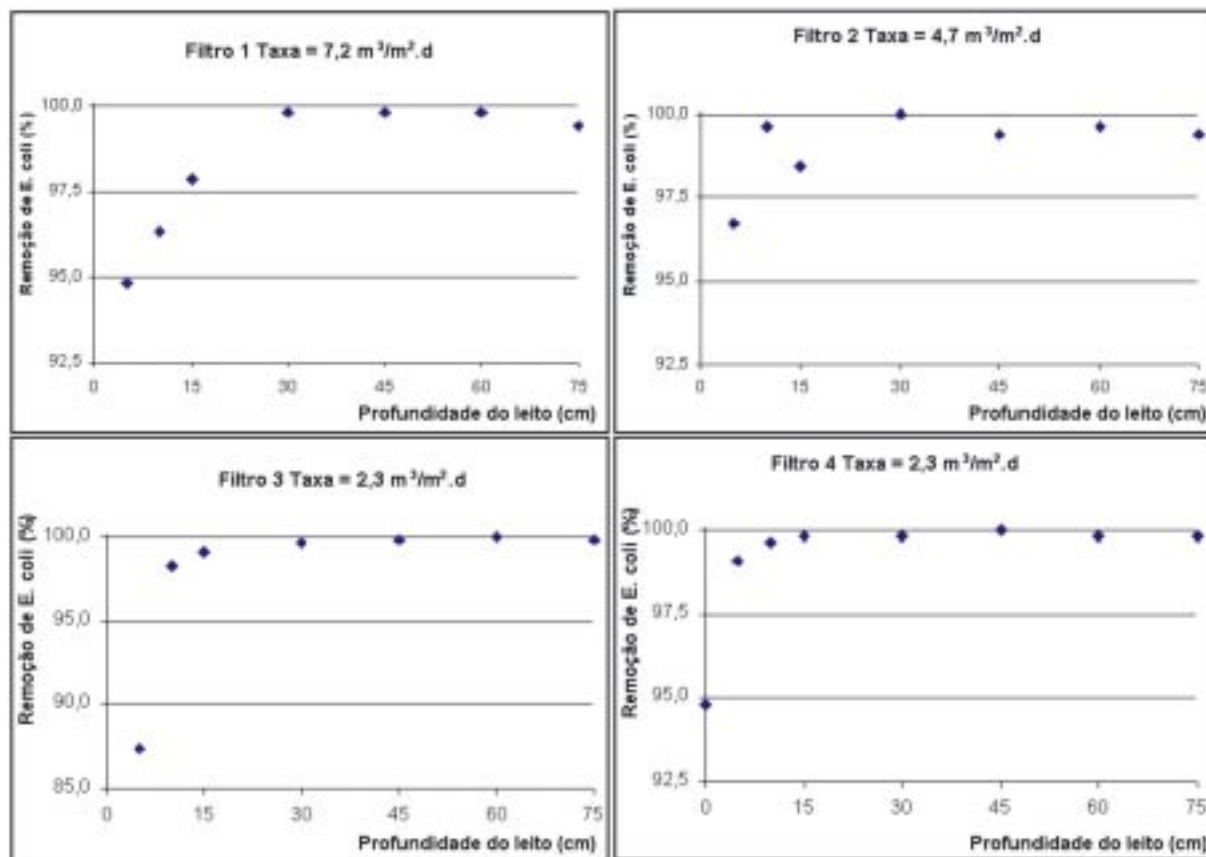
Os resultados experimentais demonstram uma excelente capacidade de remoção de *Escherichia coli*, com virtual

eliminação completa deste microrganismo para mais de 80% das amostras. Isso confirma a eficiência reportada por Visscher e Galvis (1986), que varia entre 95 e 99%, freqüentemente entre 99 e 100%, em unidades de filtração lenta. Estes resultados tendem a credenciar a filtração lenta como excelente processo para remoção de contaminação fecal. Pode ser um aspecto relevante na escolha de processos de tratamento, vez que as agências reguladoras têm recomendado a adoção da *Escherichia coli* como padrão de potabilidade e indicador biológico de qualidade de águas para abastecimento.

Como é de amplo conhecimento no

meio técnico, boa parte da eficiência dos filtros lentos deve-se a fenômenos físicos e biológicos observados nas camadas superficiais do leito filtrante. Os resultados relativos à remoção de turbidez, cor aparente, coliformes totais e *Escherichia coli* retratam a evolução do processo de purificação ao longo do leito filtrante.

Vários fatores são referenciados como parâmetros de determinação da profundidade útil dos filtros lentos. No entanto, considera-se que o atendimento em níveis satisfatórios de eficiência para indicadores básicos de potabilidade como os monitorados no experimento traduz a expectativa de garantir efluentes sanitariamente ade-



Obs. F1, F2, F3: Descendentes Ponto 0 = interface entre a camada sobrenadante e o leito filtrante
 F4: Ascendente Ponto 0 = interface entre a camada suporte e o leito filtrante

Figura 13. Remoção de *Escherichia coli* (mediana) em relação à profundidade do leito filtrante

quados para unidades de filtração lenta. Neste sentido, os resultados da pesquisa sugerem como adequada a faixa de valores de espessura mínima de leito filtrante entre 40 e 60 cm, já com certa margem de segurança, uma vez que após os 30 cm iniciais não foram verificadas alterações significativamente relevantes nos indicadores avaliados.

Apesar de não ser um indicador usual de potabilidade, convém ressaltar que estudos conduzidos por McConnel (1984) revelaram que somente 2% dos vírus que entram na areia permanecem viáveis no leito, sendo que estes ficam retidos majoritariamente nos primeiros 35 cm do leito, o que reforça as constatações de segurança sanitária a partir de espessuras superiores a 40 cm.

É importante assinalar que, nos filtros descendentes, é necessário se prever uma sobre-espessura, para acomodar a periódica operação de raspagem da superfície do leito. Esta camada deve ser dimensionada de acordo com as previsões de frequência e espessura das raspagens, as

quais, por sua vez, dependem das características do leito filtrante e da água bruta.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados descritos no corpo do trabalho e das considerações teóricas efetuadas, conclui-se que:

- ♦ A remoção de sólidos e bactérias, tanto nos filtros de fluxo descendente quanto no ascendente, ocorre predominantemente nos 30 cm iniciais do leito filtrante. A partir daí até a extensão restante são observadas apenas variações pouco significativas.

- ♦ A grande eficiência demonstrada nos 30 cm iniciais do leito filtrante pode indicar a possibilidade de redução da sua espessura útil (mínima) para faixas de 40 a 60 cm, que, conforme demonstrado, assegura uma eficiente redução dos níveis de coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez e cor aparente.

- ♦ Os resultados sugerem, em geral, um adequado desempenho da filtração lenta na remoção de bactérias. Foi observada

uma remoção média variável de 2 a 3 log de coliformes totais para os filtros-piloto.

- ♦ A filtração lenta constitui-se em um processo com excelente índice de remoção do grupo *Escherichia coli*, sendo freqüente a completa remoção.

- ♦ O filtro de fluxo ascendente apresentou desempenho superior ao verificado para os filtros descendentes, em relação à remoção de cor verdadeira e aparente.

- ♦ O filtro de fluxo ascendente apresentou uma eficiência na remoção de coliformes totais, *Escherichia coli* e turbidez pouco inferior à verificada para os filtros de fluxo descendente.

- ♦ A remoção mediana de cor verdadeira variou para os filtros-piloto entre 35% e 52%, sendo ligeiramente mais elevada para os filtros com menores taxas de filtração. Há que se ressaltar que a amplitude de variação da eficiência é bastante alta, especialmente para os filtros de maior taxa.

- ♦ A filtração lenta apresenta uma elevada eficiência na remoção de sólidos

coloidais e em suspensão, medidos pelo parâmetro turbidez. Os valores efluentes apresentaram-se consistentemente inferiores a 1,0 UNT e quase totalmente inferiores a 2,0 UNT. Conclui-se pela sua adequação ao consumo humano, considerando os guia da OMS e a Portaria 1469/2000 do Ministério da Saúde.

◆ A eficiência na remoção de turbidez aumenta com o decorrer das carreiras de filtração.

◆ O filtro de fluxo ascendente demonstrou uma ótima capacidade de amortecimento de picos de turbidez, funcionando ininterruptamente por mais de três meses, sem perda de carga e deterioração da qualidade do efluente significativas.

◆ A perda de carga nos filtros descendentes ocorre substancialmente nos 5 cm iniciais do leito filtrante, cuja parcela na perda de carga total pode chegar a 95% no final das carreiras.

◆ As taxas de filtração não apresentam significativa influência nos parâmetros de qualidade da água monitorados.

◆ Ocorrem no sobrenadante dos filtros descendentes processos de purificação responsáveis por significativas reduções nos níveis de sólidos e bactérias.

◆ A remoção de coliformes totais no sobrenadante parece guardar relação com o tempo de detenção do afluente nesta camada.

◆ A filtração lenta de fluxo ascendente tem um potencial de aplicabilidade que carece de mais investigações. A realização de pesquisas pode credenciá-la como alternativa no tratamento de águas de abastecimento, dadas sua estabilidade e simplicidade operacional.

◆ O filtro lento pode se configurar em uma alternativa sustentável no tratamento de águas de abastecimento para comunidades de pequeno e médio portes, representando um potencial subutilizado de contribuição para a universalização do suprimento de água e melhoria dos indicadores sanitários e de saúde pública no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELLAMY, W.D., HENDRICKS, D.W., LOGSDON, G.S. Slow sand filtration: Influences of selected process variables. *Journal of the American Water Works Association*. New York. V.77., N.12. p. 62-66. Dec. 1985a.
- BELAMY, W. D., et al. Removing Giardia cysts with slow sand filtration. *Journal of the American*

Water Works Association - Research And Technology. New York. Fasc.2, p. 52-59. Feb 1985b.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria 1469 de 29 de dezembro de 2000. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília: DOU de 22/2/2001.

BURMAN, N.P., LEWIN, J. - Microbiological and operational investigation of relative effects of skimming and in situ sand washing on two experimental slow sand filters. *Journal of the Institute of Water Engineers*, V.15, p.355-367. 1961.

CLEASBY, J.L., Source water quality and pretreatment options for slow sand filters, In LOGSDON, G. S. *Slow sand filtration*. Report to Committee on slow sand filtration, New York: Published by American Society of Civil Engineers; 1991. V. 1 Chapt.3 . p.69-100.

CLEASBY, J.L., HILMOE, D.J., DIMITRACOPOULOS, C.J. - Slow sand and direct in-line filtration of a surface water. *Journal of the American Water Works Association*. New York N. 12, p.44-55, 1984.

COLLINS, R.M, et al. Removing natural organic matter by conventional slow sand filtration. *Journal of the American Water Works Association - Research And Technology*. New York. N. 5, p. 80-90. May 1992.

COSTA, R.H.R. Estudos comparativos da eficiência de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente - Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Saneamento, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1980. 89p.

DI BERNARDO, L., BRANDÃO, C.C.S., HELLER, L. *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas*. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 1144p.

ELLIS, K. V. Slow sand filtration. *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, V.15, N.4, p. 315-354. 1985.

GRINPLASTCH, B.S. Nova técnica de filtração em uso no Brasil. *Revista Engenharia Sanitária*, Rio de Janeiro, V.11, N.2. p. 82-93. Nov. 1972

HAARHOFF, J., CLEASBY, J.L. Biological and physical mechanisms in slow sand filtration. In: LOGSDON, G. S. *Slow sand filtration*. A report prepared by the Task Committee on Slow Sand Filtration. New York: American Society of Civil Engineers; 1991. V. 1 Chapt.2 . p19-68.

HALL, E. L. , DIETRICH A. M. A brief history of drinking water. *Opflow - American Water Works Association*. New York V. 26, No. 6 Jun. 2000

MC.CONNEL, L.J. *Evaluation of the slow rate sand filtration process for treatment of drinking water containing viruses and bacteria*, Utha State University, USA, 1984

MURTHA, N.A. Avaliação da influência de variáveis hidráulicas e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. 208p.(Dissertação de Mestrado em Saneamen-

to, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)

PYPER, G.R., LOGSDON, G.S. Slow sand filter design, In Logsdon, G. S. *Slow sand filtration*. Report to Committee on Slow Sand Filtration , New York: American Society of Civil Engineers, 1991. V. 1 Chapt.5 . p122-148

SEELAUS, T.J., HENDRICK, D.W.S., JANONIS, B.A., Design and operation of a slow sand filter. *Journal of the American Water Works Association* . New York, N.12 ,p.35-41, Dec.1986

VALENCIA, J.A. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Lima: CEPIS/OPAS, 1981, 558 p. Série Técnica.

VISSCHER, J.T. Slow sand filtration: desing, operation, and maintenance. *Journal of the American Water Works Association - Research And Technology* . New York. V. N.6, p.67-71. June 1990.

VISSCHER, J.T., GALVIS, G. Slow sand filtration back in business. *Journal of the American Water Works Association*. New York. V.78, N 12 , p 92-94, Dec.1986.

Endereço para correspondência:

Léo Heller
Universidade Federal de Minas Gerais
DESA
Av. Contorno, 842/715
CEP:30110-060
Belo Horizonte - MG
Tel.: (31) 3238-1958
Fax: (31) 3238-1879
E-mail: heller@desa.ufmg.br