

1333 - REMOÇÃO DE FÓSFORO EM FILTROS DE ESCOAMENTO ASCENDENTE COM LODO DE ETA E SERRAGEM COMO ADSORVENTES

Fátima Resende Luiz Fia⁽¹⁾

Engenheira Agrícola (UFLA), mestre e doutora em Recursos Hídricos e Ambientais no programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (UFV). Professora do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (DAM/EENG/UFLA).

Dayana Cristine Barbosa Mafra⁽²⁾

Engenheira Ambiental (UFLA), mestre em Engenharia Agrícola (UFLA).

Ronaldo Fia⁽³⁾

Engenheiro Agrícola e Ambiental (UFV), mestre e doutor em Recursos Hídricos e Ambientais no programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (UFV). Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (DAM/EENG/UFLA).

Wanessa Fraga Rodrigues⁽⁴⁾

Graduação em Química (UFLA), Pós-graduanda em Engenharia Ambiental (UFLA).

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000 • Lavras/MG – Brasil - Tel: +55 (35) 3829-5235 - e-mail: fatimarlf@ufla.br

RESUMO

O aproveitamento do lodo de estações de tratamento de água na remoção de fósforo tem sido considerada uma importante alternativa de uso benéfico, permitindo minimizar dois problemas ambientais: o lançamento de efluentes com concentrações de fósforo em corpos hídricos e a disposição inadequada do lodo gerado durante o processo de tratamento da água. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a remoção de fósforo em filtros preenchidos com serragem e lodo de ETA. Foram construídas duas colunas de filtração com tubo de PVC com diâmetro interno de 0,10 m e 1,00 m de altura. As camadas internas foram preenchidas na seguinte ordem para o Filtro 1 (F1) - uma camada de 0,30 m de serragem, seguido por uma camada de 0,40 m do resíduo, finalizando com outra camada de 0,30 m de serragem; para o Filtro 2 (F2) - mistura de serragem e resíduo na proporção de 1:1, sendo que foi utilizado lodo seco peneirado proveniente da Estação de Tratamento de Água da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Além disso, tanto na extremidade inferior quanto na superior foram colocadas telas de malha fina para evitar a perda de resíduos. O experimento foi conduzido por um período de 6 meses, sendo realizadas análises de pH, P total, ortofosfato, condutividade elétrica, Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), DQO e sólidos totais, suspensos e dissolvidos. E para o lodo, foi avaliado o ponto de carga zero (PCZ) e uma amostra foi encaminhada para o Laboratório de Análises de Solos da UFLA para sua caracterização química. Pela caracterização do lodo em laboratório foi possível notar que é um resíduo com grande quantidade de ferro, potássio e manganês. Os filtros tiveram boas eficiências de remoção de fósforo total de 91%, de fosfato 85 e 83%, respectivamente para F1 e F2. Em relação à matéria orgânica, os valores médios de DQO foram de 142,05 mg L⁻¹ para o efluente ao final do dia para o filtro 1 e de 142,17 mg L⁻¹ para o efluente ao final do dia para o filtro 2, não se diferenciando estatisticamente e obteve-se eficiência de remoção de aproximadamente 58% para nitrogênio (NTK), para ambos os filtros.

PALAVRAS-CHAVES: adsorção; resíduo sólido; efluente sanitário;

INTRODUÇÃO

O lançamento inadequado de águas residuárias contendo altas concentrações de fósforo em corpos hídricos têm sido associado a impactos ambientais, econômicos e sociais significativos. Esses impactos incluem a desoxigenação da água, levando à mortalidade de espécies aquáticas; o aumento dos custos de purificação de água potável; e riscos à saúde humana devido à presença de toxinas produzidas por cianobactérias (MAJED et al., 2012).

Com o objetivo de mitigar os efeitos adversos do fósforo nos efluentes, diversos estudos têm explorado métodos de remoção desse nutriente, especialmente por meio de processos de adsorção utilizando resíduos alternativos (MARONEZE et al., 2014). Entre os materiais comumente avaliados estão o biocarvão (NOVAIS et al., 2018; WAN et al., 2017) e o lodo proveniente de estações de tratamento de água (BAL KRISHNA; ARYAL; JANSEN, 2016; DASSANAYAKE et al., 2015).

O lodo gerado em estações de tratamento de água (ETA) possui características que variam conforme as propriedades da água bruta e os processos de tratamento aplicados, e em geral, é composto por sólidos suspensos oriundos da água captada, elementos químicos dissolvidos e os coagulantes empregados no processo de tratamento (LIBÂNIO, 2008). Contudo, a disposição inadequada desse resíduo em corpos hídricos pode resultar em impactos negativos, como o aumento de metais tóxicos, incluindo cromo, níquel, chumbo, mercúrio, zinco, cádmio, cobre, ferro e alumínio (DASSANAYAKE et al., 2015). Além disso, altas concentrações de sólidos suspensos reduzem a luminosidade no meio aquático, comprometendo a produtividade do fitoplâncton.

Dada a problemática ambiental associada ao lodo de ETA, diversas alternativas de disposição final têm sido propostas. Estas incluem sua utilização em aterros sanitários, no cultivo de gramíneas e plantas cítricas, no setor agrícola, na construção civil, em processos industriais e como adsorvente de contaminantes e metais pesados (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016; RAMALHO, 2015).

A reciclagem do lodo de ETA para remoção de fósforo apresenta-se como uma solução sustentável, contribuindo para mitigar dois problemas ambientais: a disposição inadequada do lodo gerado e o lançamento de efluentes com altas concentrações de fósforo em corpos d'água.

OBJETIVOS

Avaliar a remoção de fósforo de efluentes sanitários da Universidade Federal de Lavras (UFLA) utilizando filtros preenchidos com serragem e lodo de ETA proveniente da mesma instituição.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido nas dependências da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, latitude 21°14'S, longitude 44°59'W, altitude média de 919 m e clima Cwa, segundo a classificação de Köppen.

O resíduo utilizado nestes ensaios foi proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), cuja classificação é de tratamento convencional - captação, pré-oxidação com hipoclorito de cálcio, controle de pH com carbonato de sódio, coagulação com cloreto férrico, floculação, decantação, filtração em areia e carvão ativado, e desinfecção com hipoclorito de cálcio. O lodo foi obtido a partir da desidratação em leitos de secagem (Figura 1a), do efluente proveniente da limpeza dos filtros e do decantador da ETA/UFLA. Após o período de secagem, o lodo foi retirado do leito, triturado em liquidificador e passado em peneira de 0,425 mm de espessura (Figura 1b), de acordo com o Ribeiro (2017).

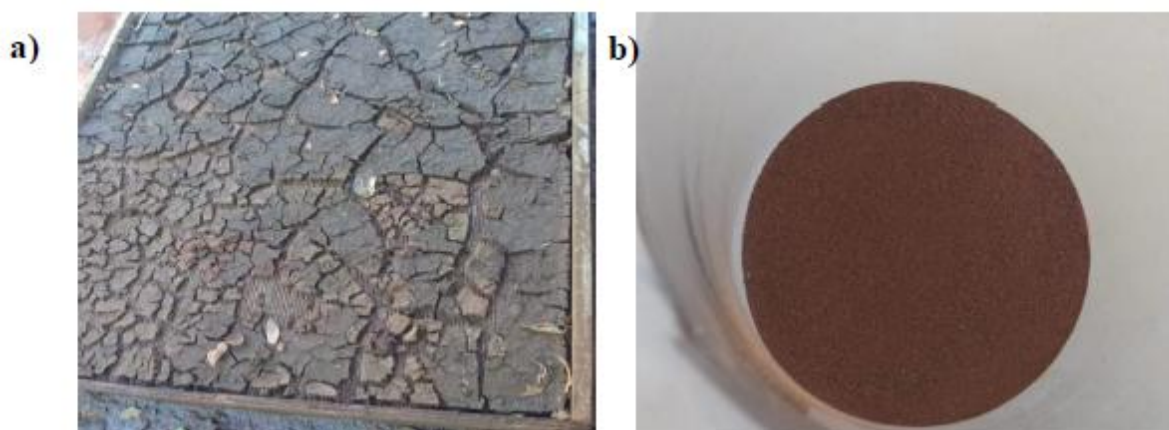


Figura 1: a) Lodo seco em leito de secagem construído na ETA da UFLA; b) Lodo seco, triturado e passado em peneira de 0,425mm.

O efluente tratado foi proveniente da ETE/UFLA após passar pelo tratamento em reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) e Filtros Biológicos Aerados Submersos (FBAS). A estação recebe diariamente o efluente resultante das diversas atividades realizadas dentro da instituição, que incluem os

departamentos, pavilhões de aulas, laboratórios e hospital veterinário, excetuando-se os resíduos químicos de laboratórios, que são coletados separadamente.

Os filtros (Figura 2) foram confeccionados baseados no protótipo desenvolvido por Ribeiro (2017). Foram utilizados tubos de policloreto de vinila (PVC), com diâmetro interno de 0,10 m e 1,00 m de altura. As camadas internas foram preenchidas na seguinte ordem: para o Filtro 1 - uma camada de 0,30 m de serragem, seguido por uma camada de 0,40 m do resíduo, finalizando com outra camada de 0,30 m de serragem; para o Filtro 2 – mistura de serragem e resíduo na proporção de 1:1. O resíduo utilizado foi lodo seco peneirado proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da UFLA. A serragem empregada foi de madeira pinus com diâmetro médio entre 1,19 e 2,00 mm. Além disso, tanto na extremidade inferior quanto na superior foram fixadas telas de malha fina (tela mosquiteiro) para evitar a perda de resíduos.

O escoamento dos filtros foi ascendente, proporcionado por bomba dosadora da marca ProMinent, com vazão afluyente de 60 mL/min. O tempo de detenção hidráulica (TDH) foi de 2,2h, calculado pela Equação 1 (CHERNICHARO, 2007), em que TDH é o tempo de detenção hidráulico (h), V é o volume total do filtro (7,85 L) e Q_{méd} é a vazão média afluyente (L/h).

$$TDH = \frac{V}{Q_{méd}}$$

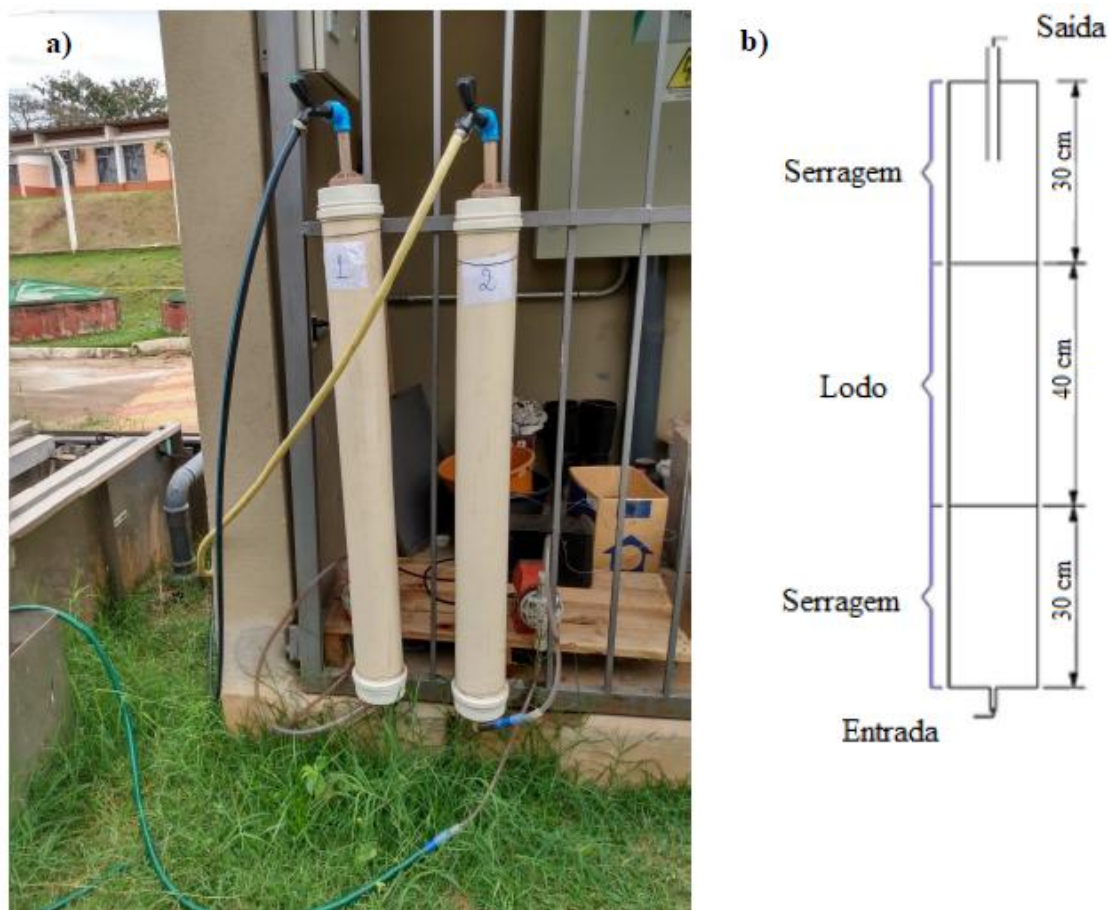


Figura 2: a) Filtros de policloreto de vinila (PVC), com diâmetro interno de 0,10 m e 1,00 m de altura. b) Esquema do preenchimento do filtro 1.

O experimento foi conduzido no período de julho a dezembro de 2019. Foram realizadas coletas de amostras a cada uma hora durante um período de 10h de monitoramento, utilizando frascos plásticos previamente

ambientados na entrada e na saída dos filtros, para análise das variáveis pH, fósforo total, ortofosfato e condutividade elétrica, análise de nitrogênio total Kjeldahl, demanda química de oxigênio e sólidos totais, suspensos e dissolvidos. Esse procedimento de coleta foi realizado em triplicata e sempre com a renovação das camadas internas, serragem e resíduo.

As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Águas Residuárias do Núcleo de Engenharia Ambiental e Sanitária do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde foram analisadas em triplicata as variáveis pH por potenciometria, fósforo total (PT), pelo método refluxo fechado titulométrico, condutividade elétrica (CE) por potenciometria, nitrogênio total Kjeldahl (NTK), pelo método micro-Kjeldahl, demanda química de oxigênio (DQO), em refluxo fechado e sólidos totais (ST), suspensos e dissolvidos, por gravimetria (APHA et al., 2022).

Como forma de avaliação do lodo, foi determinado o ponto de carga zero (PCZ) pela diferença entre pH em água e pH em KCl (1:2,5) e uma amostra foi encaminhada para o Laboratório de Análises de Solos da UFLA para sua caracterização química.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, as médias dos resultados foram comparadas pelo teste de Tukey considerando o nível de significância de 5%. Para as análises foram usados o programa de análises estatísticas e planejamento de experimentos, SISVAR

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do lodo de ETA e avaliação do desempenho em sistemas de tratamento

O lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) apresenta características que o tornam um material promissor para processos de adsorção. O ponto de carga zero (PCZ) do lodo analisado foi determinado em 1,47, permitindo prever a carga de superfície do adsorvente em função do pH da solução (SILVA et al., 2011). Em condições em que o pH da solução é inferior ao PCZ, a superfície do lodo assume carga positiva; quando superior, a superfície se torna negativamente carregada. Essa propriedade influencia diretamente a eficiência de adsorção dependendo do pH.

Tabela 1: Caracterização do lodo utilizado no experimento, proveniente da ETA/UFLA

Elemento	Concentração (mg dm ⁻³)	Elemento	Concentração
K	419,71	Ca (cmolc dm ⁻³)	1,85
P	8,73	Mg (cmolc dm ⁻³)	1,11
Zn	1,80	H+Al (cmolc dm ⁻³)	4,70
Fe	1173,40	M.O (dag kg ⁻¹)	2,90
Cu	2,09	P-Rem (mg L ⁻¹)	10,40
Mn	217,80	V (%)	46,24
B	0,26	T (cmolc dm ⁻³)	8,75
S	35,90	t (cmolc dm ⁻³)	4,05
Na	Não detectado	N (g kg ⁻¹)	5,53

* P- Rem: fósforo remanescente; SB: soma das bases trocáveis; V: índice de saturação de base; T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; t: capacidade de troca catiônica efetiva. pH (água) = 6,4

A caracterização do lodo revelou elevados teores de ferro, potássio e manganês, destacando-o como um resíduo potencialmente útil tanto para adsorção quanto para aplicação na agricultura. Diferenças nos valores observados, comparados aos descritos por Arantes (2019), indicam que variáveis como o manancial de captação e condições climáticas, especialmente períodos chuvosos, podem alterar a composição do lodo devido ao aumento da turbidez e coloração da água, que exigem maior aplicação de produtos químicos (RODRIGUES, 2015).

A interação química do lodo com fosfato é influenciada pela carga superficial dos óxidos de ferro, que variam conforme o pH. Em pH abaixo do PCZ, os grupos hidroxila da superfície do óxido de ferro tornam-se protonados, promovendo a adsorção. Em pH acima do PCZ, ocorre repulsão entre o fosfato e a superfície

carregada negativamente, reduzindo a eficiência de adsorção. Esse mecanismo é explicado pelas interações ácido/base de Lewis, onde os ânions de fosfato atuam como bases de Lewis, ligando-se aos sítios ativos do adsorvente protonado em meio ácido (BRAUN, 2018).

Monitoramento dos filtros

Os filtros utilizados apresentaram pH médio dentro da faixa ideal para a sobrevivência de bactérias responsáveis pela degradação da matéria orgânica, variando entre 6,0 e 9,0 (METCALF; EDDY, 2010). Houve leve redução do pH ao longo dos ensaios, associada à formação de ácidos durante o processo de degradação. Os efluentes tratados atenderam à legislação ambiental vigente, com valores de pH entre 6,0 e 9,0 (MINAS GERAIS, 2022).

Os sólidos totais (ST), dissolvidos (SD) e suspensos (SS) nos efluentes dos filtros apresentaram concentrações médias de 0,56; 0,61 e 0,0 mg L⁻¹, respectivamente, indicando que os sólidos presentes estavam totalmente dissolvidos (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios* de ST, SDT e SST das entradas dos filtros e das saídas coletadas nos tempos 1,5 e 10

		ST		SD		SS	
	Tempo	Filtro 1	Filtro2	Filtro 1	Filtro2	Filtro 1	Filtro2
Entrada	0	0,45a	0,45a	0,44a	0,44a	0,01a	0,01a
	1	6,31a	2,57a	6,21a	2,47a	0,10a	0,10a
Saída	5	0,68a	0,59a	0,68a	0,59a	0a	0a
	10	0,56a	0,61a	0,56a	0,61a	0a	0a

*valores médios, em mg L⁻¹, de 3 ensaios realizados;

Médias seguidas pela mesma letra na linha, não difere entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Em relação à matéria orgânica, os valores médios de DQO nos efluentes finais foram de 142 mgL⁻¹ para ambos os filtros, com eficiência de remoção de aproximadamente 25%, resultados atribuídos à presença de compostos recalcitrantes e ao baixo tempo de detenção hidráulica (TDH).

Na Figura 3, observa-se um pico inicial na concentração de DQO, o que se deve provavelmente ao arraste e à solubilização de material da serragem e do lodo de ETA, nas primeiras horas de aplicação do efluente, e que por possuírem carbono em suas composições resultou no aumento de DQO na saída dos filtros, o que influenciou nos valores de condutividade elétrica.

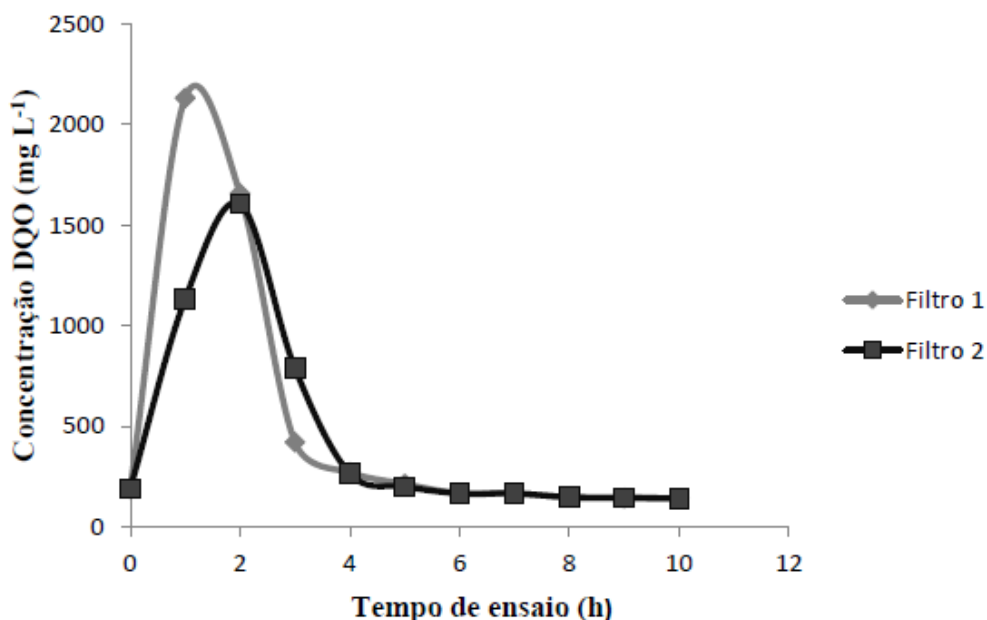


Figura 3: Comportamento da concentração de DQO em função do tempo.

Na remoção de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), os filtros apresentaram eficiência média de 58%, com valores finais de NTK de 9,97 e 9,89 mgL⁻¹ para os dois filtros, sem apresentar diferença entre eles pelo Teste de Tukey ao nível de significância de 5%. A volatilização de amônia foi considerada insignificante devido ao pH próximo à neutralidade. Comparativamente, Santos (2016) relatou eficiência inferior (36,9%) utilizando carvão ativado no tratamento de efluentes de abatedouros.

A remoção de fósforo pelos filtros foi eficiente, com valores médios de fósforo total (PT) de 0,71 mgL⁻¹ e fosfato de 0,67 e 0,75 mgL⁻¹ para os Filtros 1 e 2, correspondendo a eficiências de 91% para PT e 85% e 83% para fosfato. Esses resultados superam os obtidos por Scalize (2003), que relatou 28% de remoção de fosfato em um sistema de tratamento com efluente bruto. A maior eficiência inicial observada foi atribuída à saturação dos sítios de adsorção ao longo do ensaio.

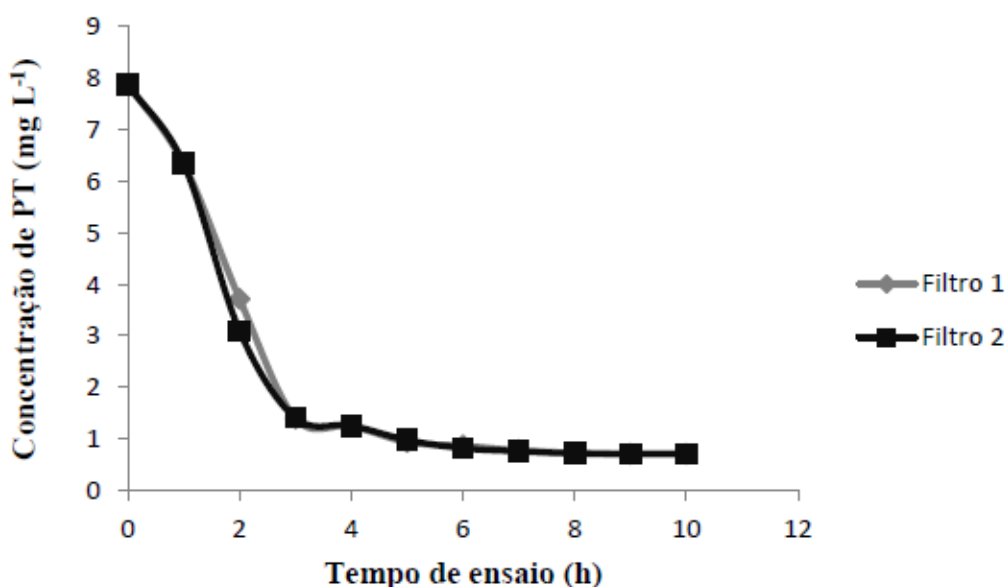


Figura 4: Comportamento da concentração de PT em função do tempo.

Estudos complementares, como o de Ribeiro (2017), indicam que o lodo de ETA pode atingir remoções médias de 80% de fósforo total em sistemas simulados. Resultados semelhantes foram relatados por Arantes (2019) em um reator de escoamento ascendente com lodo de ETA e areia, alcançando 96% de eficiência. Além disso, Torit e Phihusut (2019) observaram remoções superiores a 90% utilizando cinzas de casca de ovo, corroborando o potencial de materiais alternativos e de baixo custo para o tratamento de águas residuárias.

CONCLUSÃO

Conclui-se que os filtros avaliados apresentaram elevada eficiência como unidades de pós-tratamento no sistema de tratamento de efluente sanitário, atendendo ao objetivo principal deste estudo, que foi a remoção de fósforo. Não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os modelos de filtros, indicando que a escolha do mais adequado pode ser realizada com base na facilidade de construção e implementação.

Os resultados obtidos atenderam integralmente aos parâmetros estabelecidos pela legislação ambiental estadual para pH (entre 6,0 e 9,0), demanda química de oxigênio (DQO, inferior a 180 mg/L), sólidos suspensos totais (até 100 mgL⁻¹) e nitrogênio total (até 20,0 mgL⁻¹). Apesar de a legislação nacional não definir limites específicos para o fósforo em efluentes tratados, o sistema demonstrou uma eficiência significativa, com uma taxa de remoção de 91%.

Ainda que os resultados tenham sido promissores, recomenda-se a realização de estudos complementares para explorar a capacidade do sistema na remoção de outros compostos presentes em efluentes sanitários e ampliar a compreensão sobre os mecanismos envolvidos na adsorção de poluentes. Tais investigações podem

contribuir para o aprimoramento do sistema e sua aplicação em diferentes contextos de tratamento de águas residuárias.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem a FAPEMIG e a CAPES pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 1-13, 2016.
- APHA. American Public Health Association. AWWA. American Water Works Association). WEF. Water 118 Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 24th. ed. Washington. D. C.: APHA/AWWA/WEF, 2022.
- ARANTES, R. B. D. S. *Sorção de fósforo de efluente doméstico tratado em lodo de eta e aplicação do resíduo em solo cultivado com milho*. 2019. 87p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- BAL KRISHNA, K. C.; ARYAL, A.; JANSEN, T. Comparative study of ground water treatment plants sludges to remove phosphorous from wastewater. *Journal of Environmental Management*, v. 180, p. 17-23, 2016.
- BRAUN, J. C. A. *Adsorção de fósforo em carvão ativado impregnado com óxidos de ferro*. 2018. 92p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2018.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios*. 2ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), 2007. 380 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5).
- DASSANAYAKE, K. B.; JAYASINGHE, G. Y.; SURAPANENI, A.; HETHERINGTON, C. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. *Waste Management*, v. 38, p. 321-335, 2015.
- LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Editora Átomo, 2ª edição. Campinas 2008. 444p.
- MAJED, N.; LI, Y.; GU, A. Z. Advances in techniques for phosphorus analysis in biological sources. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 23, p. 1-8, 2012.
- MARONEZE, M. M.; ZEPKA, L. Q.; VIEIRA, J. G.; QUEIROZ, M. I.; JACOB-LOPES, E. A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente & Água*, v. 9, p. 445-458, 2014. ISSN 1980-993X.
- METCALF, L.; EDDY, H. P.; TCHOBANOGLOUS, G. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill, 2010.
- MINAS GERAIS – COPAM – Conselho de Política Ambiental; CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos. *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2022.
- NOVAIS, S. V. et al. Phosphorus removal from eutrophic water using modified biochar. *Science of the Total Environment*, v. 633, p. 825-835, 2018.
- RAMALHO, R. P. R.S. *Avaliação do uso de resíduo de estação de tratamento de água na produção de espécies vegetais com ocorrência no cerrado*. Trabalho de Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2015, 96 p.
- RIBEIRO, I. C. A *Remoção de fósforo do esgoto tratado utilizando lodo de ETA e casca triturada de ovo como sorventes*. 2017. 73 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- RODRIGUES, F. N. *Caracterização dos resíduos da estação de tratamento de água da UFLA e aproveitamento na confecção de tijolos de solo-cimento*. 2015. 117 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015
- SANTOS, N. M. *Remoção de nitrogênio amoniacal e fósforo de efluente de abatedouro de bovinos, utilizando carvão ativado*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.
- SCALIZE, P. S. *Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 171p. 2003.

SILVA, F. M. da; SANTANA, S. A. A.; BEZERRA, C. W. B.; SILVA, H. A. dos S. Adsorção do corante têxtil azul de remazol R por pseudocaule da bananeira (*Musa* sp). *Cadernos de Pesquisa*, v. 17, n. 3, p. 71-77, 2011.

TORIT, J.; PHIHUSUT, D. Phosphorus removal from wastewater using eggshell ash. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 33, p. 34101-34109, 2019.

WAN, S.; WANG, S.; LI, Y.; GAO, B. Functionalizing biochar with Mg–Al and Mg–Fe layered double hydroxides for removal of phosphate from aqueous solutions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 47, p. 246-253, 2017.