

II-1331 – REMOÇÃO DE FÓSFORO DE EFLUENTE DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO BRASÍLIA NORTE POR ADSORÇÃO UTILIZANDO NANOADSORVENTE CORE@SHELL BIMAGNÉTICO

Daniel Augusto Santos Prates Beltrão⁽¹⁾

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

Vitória Régia Araújo Ribeiro⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutoranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos na Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

Ana Maria do Carmo Mota⁽³⁾

Superintendente de Operação e Tratamento de Esgotos (POE) da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb).

Alex Fabiano Cortez Campos⁽⁵⁾

Doutor em Química pela Universidade de Brasília e pós-doutor pela Sorbonne Université, Paris. Professor associado da Universidade de Brasília (UnB).

Ariuska Karla Barbosa Amorim⁽⁶⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal da Paraíba. Doutora em Engenharia Civil - área de concentração Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB).

Endereço⁽¹⁾: Universidade de Brasília - Campus Darcy Ribeiro, Anexo SG 12 - Asa Norte - Brasília, Distrito Federal, Brasil - CEP 70.910-900 - Contato: (61) 98235-3984 - e-mail: beltraodaniel2@gmail.com

RESUMO

A presença do fósforo (P) em águas residuárias representa um grande desafio no cenário das estações de tratamento de esgoto, pois quando não tratados ou se tratados de maneira ineficiente, os efluentes contendo esse nutriente chegam até os corpos hídricos, podendo causar o fenômeno de eutrofização e uma série de efeitos negativos ao ambiente. Assim, diversas tecnologias já são conhecidas para remover o fósforo de águas residuárias, porém muitas vezes não são capazes de atingir os valores mínimos para o lançamento nos corpos receptores. É o caso da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte - ETE Norte, localizada em Brasília/DF, que precisou incorporar a etapa de polimento final por processos convencionais para alcançar níveis aceitáveis de lançamento, de acordo com as especificidades de seu corpo receptor, o Lago Paranoá. Porém, essa tecnologia não promove a recuperação de P, que possui disponibilidade limitada no planeta e o fósforo removido permanece nos resíduos líquidos gerados na estação, que são recirculados para o início do tratamento. Em contrapartida aos processos usuais, foi proposta no presente trabalho uma nova abordagem através do processo de adsorção utilizando a nanopartícula magnética core@shell $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. O uso de nanopartículas magnéticas facilita a separação do P do efluente tratado, permite a reutilização do nanomaterial utilizado e a recuperação do fósforo adsorvido. Neste trabalho, utilizou-se o líquido clarificado de centrífuga da ETE Norte, que possui alta concentração de fósforo ($> 90 \text{ mg/L}$) para testar diversas condições de ensaios, de maneira que o valor do pH e o tempo de contato foram os parâmetros que apresentaram maior influência no adsorção de P. A eficiência máxima de remoção do fósforo nas amostras atingiu valor próximo a 45%, o que representa uma quantidade significativa de P que pode ser removida através desse processo e indicando o potencial do uso dessa tecnologia para o emprego em escala real.

PALAVRAS-CHAVE:

Nanopartículas magnéticas; Remoção de Nutrientes; Recuperação de fósforo; Nanoadsorventes.

INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento químico que desempenha papel essencial para os seres humanos, atuando na sinalização celular, metabolismo ósseo e metabolismo energético (Fu *et al.*, 2020). Além disso, o P é um nutriente fundamental para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica e um dos elementos mais críticos para o crescimento de algas nos ambientes aquáticos naturais que, sob determinadas condições, pode levar a fenômenos de eutrofização de ambientes aquáticos.

A eutrofização consiste crescimento excessivo de plantas aquáticas em níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água (Thomann e Mueller, 1987), provocando diversos efeitos indesejáveis nas águas superficiais, tais como a floração de algas nocivas, maus odores, mortandade de peixes e aumento dos custos de tratamento de água para consumo humano (Von Sperling, 2018).

A ocorrência global desse fenômeno fez com que a remoção de fósforo em águas contaminadas recebesse grande atenção dos pesquisadores ao longo das últimas décadas. Levando em que consideração que uma das principais fontes de fósforo em corpos hídricos provém do lançamento de efluentes sanitários, diversas tecnologias já foram desenvolvidas para eliminar o P de águas residuárias, tais como a remoção biológica e a precipitação química.

No entanto, mesmo esses processos apresentando boa eficiência, muitas vezes a capacidade de remoção do fósforo não atinge valores mínimos necessários para o lançamento nos corpos receptores sem causar perturbação nesses ambientes. Além disso, as tecnologias convencionais não permitem a recuperação do fósforo removido da água, o que deve ser levado em consideração devido à importância do P na agricultura e indústria e ao fato da rocha fosfática, fonte primária do material, ser um recurso limitado e não renovável.

Nesse cenário, a adsorção surge com uma alternativa promissora, pois além de ser um processo eficiente para remoção de fósforo, permite o reuso dos adsorventes e a recuperação do P adsorvido. Esse processo consiste na habilidade de certos sólidos (adsorventes) em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, os chamados adsorvatos, possibilitando a separação dos componentes desse fluido.

Além da possibilidade de recuperação do fósforo de efluentes sanitários, a adsorção despertou interesse crescente para a remoção de fósforo das águas residuárias devido a facilidade de projeção e operação e a não produção adicional de lodo, de maneira que, na última década vários adsorventes foram desenvolvidos para remoção de fósforo de águas residuárias incluindo resíduos e subprodutos agrícolas, resinas de troca iônica, adsorventes à base de óxido de ferro, materiais contendo alumínio e hidróxidos de dupla camada (Xu *et al.*, 2016).

No entanto, são necessárias etapas adicionais de filtração ou centrifugação para a separação dos adsorventes da solução aquosa, o que se torna dispensável quando são adicionadas características magnéticas ao material adsorvente. Esse foi o caso dos estudos realizados por Drenkova-Tuhtan *et al.* (2017) e Xu *et al.* (2016) que abordaram o uso de nanoadsorventes para a remoção de fósforo sintetizados com propriedades magnéticas para facilitar a remoção das partículas carregadas de fósforo.

Tu e You (2015) destacam ainda que, comparado com métodos convencionais de separação, como a filtração e centrifugação, a separação magnética pode ser considerada uma tecnologia mais rápida e eficaz. Ressalta-se o fato desses autores terem empregado nanopartículas em seus trabalhos, o que está relacionado com o aumento da eficiência de adsorção conforme aumenta área superficial da superfície por unidade de massa, fator observado nos estudos de Guerra *et al.* (2020), onde os autores avaliaram a aplicação de um mesmo nanoadsorvente com dois diâmetros diferentes, observando que o de menor diâmetro foi o mais eficaz na remoção de P, uma vez que possuía maior área superficial para a captura de P.

O nanomaterial empregado por Guerra *et al.* (2020) foi o $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, o mesmo utilizado no presente estudo, de forma que os autores obtiveram eficiência expressiva na remoção de P. No entanto, Guerra *et al.* (2020) realizaram ensaios principalmente com solução aquosa enriquecida de fósforo e testes com efluentes reais foram dessa vez realizados a fim de se avaliar as condições mais próximas do cenário encontrado nas estações de tratamento de esgoto.

Assim, o objetivo geral do presente trabalho consistiu em estudar, em escala de bancada, o processo de remoção e recuperação de fósforo de efluente de Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs, utilizando nanoadsorvente core@shell bimagnético $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, visando a sua aplicação em escala real.

MATERIAIS E MÉTODOS

O alvo deste trabalho foi efluente da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte - ETE Norte, responsável pelo atendimento de cerca de 260.000 habitantes do Distrito Federal e com capacidade para tratar vazão média de 920 L/s (GDF, 2017). Atualmente, o tratamento na estação é realizado através de sistema de remoção biológica de nutrientes (aeróbio, anaeróbio e anóxico), seguido de polimento final, visando também a remoção de nutrientes.

O tratamento na estação conta ainda com as etapas de tratamento preliminar (gradeamento e desanador) para remoção de materiais grosseiros, decantador primário para remoção de sólidos sedimentáveis e decantador secundário, onde ocorre nova separação de fases e parte dos sólidos retorna ao reator biológico. A outra parte do lodo biológico, assim como o lodo gerado no decantador primário, é encaminhada para o adensador por flotação e posteriormente para os digestores anaeróbios, que têm a função de estabilizar a matéria orgânica e favorecer a etapa posterior de desidratação.

A desidratação tem como objetivo reduzir o volume de lodo gerado, facilitando a sua disposição final. Na ETE Norte, esse processo é mecanizado e ocorre com o emprego de centrífugas desaguadoras, que realizam nova separação sólido-líquido, gerando o resíduo sólido (torta) e o líquido clarificado, que apresenta concentrações elevadas de P e, portanto, maior potencial para recuperação desse elemento. Por esse motivo, o efluente clarificado das centrífugas foi escolhido para a coleta das amostras usadas nos ensaios de caracterização e adsorção.

Dessa forma, para que o objetivo proposto para este trabalho fosse alcançado, a metodologia consistiu principalmente em três etapas, que foram: coleta das amostras, análises físico-químicas e os ensaios de adsorção.

A coleta foi realizada na saída do efluente clarificado de centrífuga da ETE Brasília Norte, responsável pela desidratação do lodo gerado e digerido de forma anaeróbia. Apesar da estação possuir duas centrífugas, apenas a centrífuga 1, da marca Jumbo foi selecionada para a realização das coletas, com base no critério de prioridade de operação estabelecido pela própria estação. Assim, amostras de 2 litros foram coletadas em duplicata, representando volume muito superior ao utilizado nos ensaios para minimizar as possíveis variações na composição do efluente clarificado. Essa coleta se repetiu por duas vezes, utilizando frascos limpos com solução de ácido clorídrico (HCl), a fim de se evitar a presença de substâncias interferentes.

Após a coleta, as amostras foram levadas ao Laboratório de Saneamento Ambiental - LSA da Universidade de Brasília, para as análises físico-químicas, sendo que o pH e a temperatura foram medidos imediatamente após a filtração à vácuo das amostras em membrana de 32 μm , conforme recomendações do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), por serem parâmetros sujeitos a mudanças significativas. Toda a amostra não utilizada imediatamente, foi armazenada e mantida em local refrigerado, tendo sido aclimadas em temperatura ambiente por uma hora antes da sua utilização.

Além do pH e temperatura, foram medidos a concentração inicial de fósforo, sólidos totais e a DQO, conforme os procedimentos listados na Tabela 1. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Tabela 1: Parâmetros de caracterização físico-químicos, métodos e equipamentos empregados.

Parâmetro	Unidade	Método Analítico	Padrão APHA/Referência	Equipamento utilizado
pH	-	Potenciométrico	APHA 4500 H ⁺ B	pHmetro (ORION 210 A+)
Fósforo	mg/L	Colorimétrico	APHA 4500-P	Espectrofotômetro (HACH DR 2010)
DQO	mg O ₂ /L	Colorimétrico	APHA 5220-D	Espectrofotômetro (HACH DR 2010)
Sólidos suspensos totais	mg/L	Gravimétrico, 105 °C	APHA 2540-B	Estufa

Por fim, foram realizados os ensaios de adsorção para análise da influência do tempo de contato e da concentração de nanopartículas, mantendo-se as condições iniciais de pH e concentração inicial de fósforo. Dessa forma, nos Erlenmeyers contendo 50 mL do líquido clarificado, foram adicionados os nanoadsorventes magnéticos conforme as condições definidas para cada teste. Posteriormente, seguiu-se a metodologia adotada por Guerra *et al.* (2020), submetendo as amostras a agitação orbital com velocidade e temperaturas constantes de 200 rpm e 25 °C, respectivamente. Passado o tempo de contato selecionado, foi induzido campo magnético por meio de ímã em cada Erlenmeyer por 15 minutos com o intuito de separar do meio as partículas magnéticas adsorvidas de fosfato.

As nanopartículas foram dosadas em valores de 2,5; 25; 50 e 75 mg, enquanto o tempo de contato variou entre 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120 e 180 minutos, tendo os ensaios sido repetidos por três vezes. Ao final de cada um deles, foram retiradas alíquotas em triplicata do sobrenadante para a medir a concentração final de fosfato por meio do método do ácido ascórbico. O resultado dessa análise permitiu a obtenção da eficiência do processo por meio da equação de balanço de massa, uma vez que a concentração inicial já era conhecida.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através das análises laboratoriais, foi possível determinar a concentração inicial de fósforo no líquido clarificado da centrífuga, que apresentou valores muito elevados quando comparados às concentrações de fósforo total afluente à ETE e no efluente tratado, que são de 7,1 e 0,3 mg, respectivamente (Beltrão *et al.*, 2022). Os valores obtidos foram acima de 90 mg P/L nas duas rodadas de experimentos, o que confirma o grande potencial para a recuperação de fósforo nesse efluente. Esse e outros resultados encontrados para os parâmetros físico-químicos das amostras coletadas se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado da caracterização físico-química para os Ensaios I e II

Ensaio I	
C _i (mg P/L)	92,88
pH	7,72
Temperatura (°C)	25,2
SST (mg/L)	200
DQO (mg O ₂ /L)	312
Ensaio II	
C _i (mg P/L)	96,06
pH	8,15
Temperatura (°C)	25
SST (mg/L)	195
DQO (mg O ₂ /L)	293

Dentre os parâmetros listados acima, destaca-se o pH do efluente clarificado, que apresentou valores acima de 7. Nascimento et al. (2014) pontuam a influência do pH na adsorção, na medida em que esse fator determina o grau de distribuição das espécies químicas, ou seja, a variação do pH favorecerá a formação de uma espécie em relação a outras. Assim, a importância do valor do pH para o processo de adsorção se dá, pois, as cargas do adsorvato e do adsorvente devem ser opostas para que haja uma maior interação eletrostática entre ambos, pois, se as cargas forem iguais, o processo de adsorção será prejudicado, uma vez que haverá repulsão eletrostática.

Para o caso do P, Tu e You (2015) acrescentam ainda que, em altos valores de pH, sempre há competição entre íons hidroxila (OH⁻) e ânions fosfato (H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻, e PO₄³⁻) para sítios de adsorção similares e os fortes ânions hidróxidos restringem a aproximação do fosfato como consequência das forças repulsivas iniciadas. Isso explica a elevada captura de fósforo obtida em seus estudos sob condições ácidas (pH 2,64 e 3,44) para o nanoadsorvente bimetálico de ferrita. Uma diminuição acentuada da adsorção de fósforo de 99,9% para 9,9% foi observada pelos autores quando o pH da solução aumentou de 2,64 para 9,04, uma vez que o aumento no pH da solução resultou em acúmulo de cargas negativas tanto no adsorvente quanto no adsorvato, levando a um aumento da repulsão elétrica entre eles.

Guerra *et al.* (2020) obtiveram a máxima capacidade de adsorção de fosfato (71,2 mg/g) utilizando o nanoadsorvente core@shell bimetálico CoFe₂O₄@ γ -Fe₂O₃ em solução aquosa com concentração de P igual a 10 mg/L, em condições do meio com pH igual a 2,0 e temperatura ambiente de 25 °C. No entanto, o pH referente a essa condição ótima limita a aplicação do processo em escala real, pois a correção para esse valor exigiria um passo adicional e o consumo de reagentes químicos. Além disso, seria necessária também etapa posterior para adequar o pH ácido do efluente ao lançamento no corpo receptor, com de maneira a atender a legislação vigente.

Nas condições ótimas citadas, o percentual de remoção obtido pelos autores foi acima de 90%, valor superior ao encontrado nos testes com o efluente clarificado das centrífugas. Ainda assim, foram obtidas remoções consideráveis de P, principalmente se for levada em consideração a concentração elevada desse nutriente no efluente utilizado. A Tabela 2 lista os resultados encontrados para o tempo de contato de 180 minutos.

Tabela 3 - Percentual de remoção dos Ensaio I e II para o tempo de contato de 180 minutos

Dosagem (mg)	Ensaio I Remoção (%)	Ensaio II Remoção (%)
2,5	36,2	31,4
25	44,5	34,1
50	39,4	34,2
75	44,7	36,5

Nota-se que os percentuais de remoção do Ensaio I foram superiores ao do Ensaio II em todas as condições de dosagem testadas, o que pode ser explicado pelo valor do pH das amostras, uma vez que o pH da amostra do Ensaio II, igual a 8,15, foi superior ao do Ensaio I (7,72), enquanto os outros parâmetros apresentaram uma variação discreta.

Em relação ao tempo de contato, outro parâmetro analisado neste estudo, nota-se através do gráfico contido nas Figuras 1 e 2 que a curva de remoção apresenta grandes oscilações no percentual de remoção ao logo do tempo e tende se estabilizar próximo aos 180 minutos para a amostra do Ensaio I. No Ensaio II, para esse mesmo tempo de contato, o gráfico indica estar havendo ainda remoção de P.

A oscilação na remoção de P pode estar ocorrendo pelo fato de se tratar de um efluente real que contém outros constituintes que interferem na adsorção do fósforo. Guerra *et al.* (2020) analisaram a possível interferência de outros elementos comumente presentes no esgoto, dentre eles os íons carbonato (CO₃²⁻), cloreto (Cl⁻), sulfato (SO₄²⁻) e nitrato (NO₃⁻), de forma que apenas o sulfato apresentou influência negativa relevante na remoção de P. Ressalta-se, porém, que a interferência dos íons no estudo citado foi analisada separadamente para cada íon, sendo que em efluentes reais a presença deles é comum.

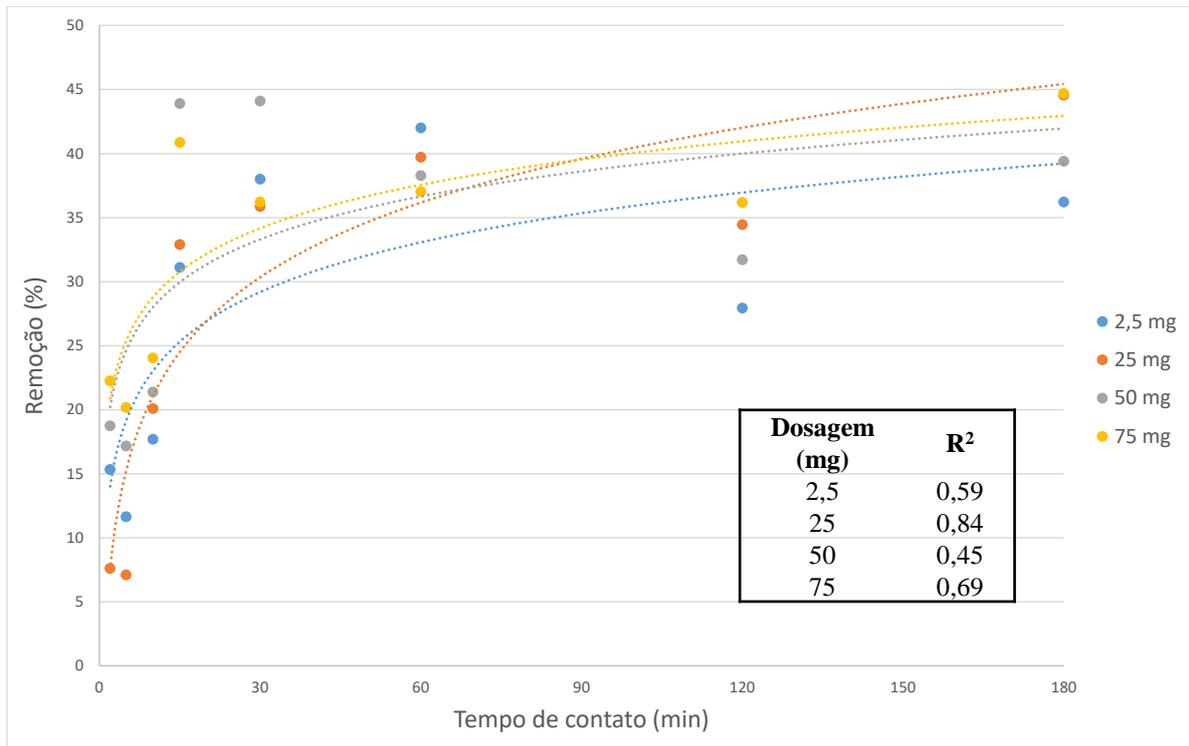


Figura 1 - Percentual de remoção x Tempo de contato para os 4 valores de dosagens testados- Ensaio I

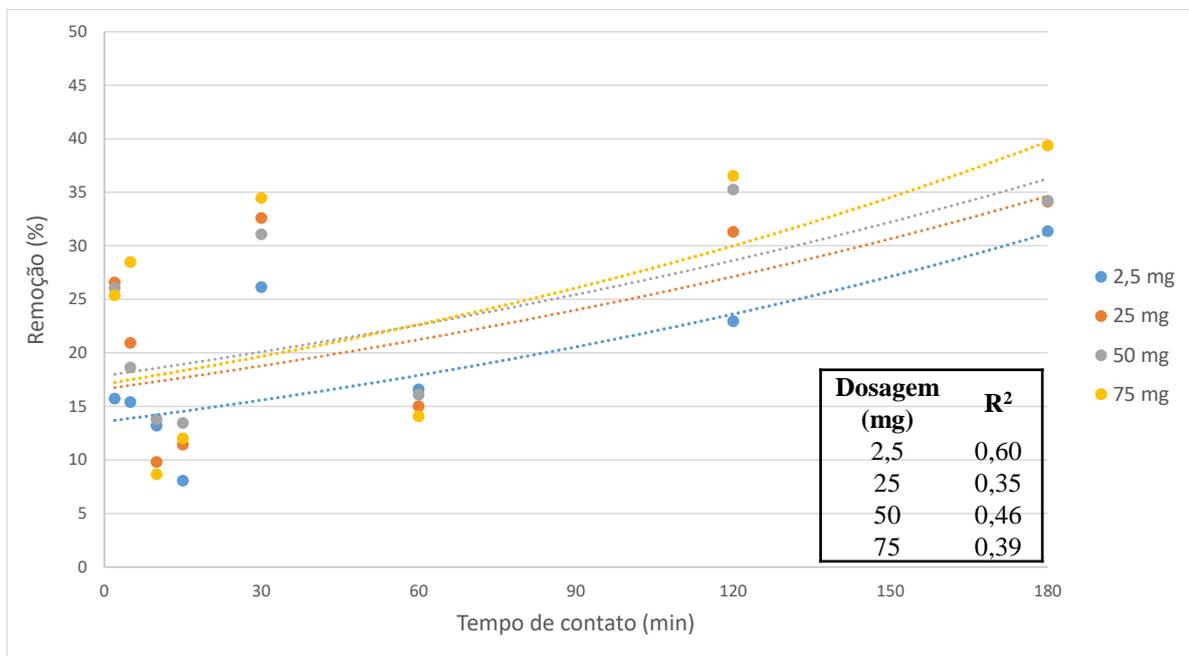


Figura 2 - Percentual de remoção x Tempo de contato para os 4 valores de dosagens testados - Ensaio II

Houve diferença também na tendência que os gráficos da remoção pelo tempo dos Ensaios I e II seguiram. Foram testadas para os dados obtidos regressões lineares, logarítmicas e exponenciais. Enquanto no Ensaio I, a regressão logarítmica apresentou melhor ajuste, com valor de R² chegando até 0,84 para a dosagem de 25 mg, os dados do Ensaio II se ajustaram melhor a tendência exponencial, com R² de 0,60 para a menor dosagem, de 2,5 mg.

Novamente, ressalta-se a diferença no valor do pH entre as amostras, de forma que a amostra II apresentou pH na faixa básica, o que influencia negativamente na adsorção de fósforo. Nota-se que, na amostra do Ensaio II e, para o tempo máximo de experimento adotado no presente estudo (180 minutos), a curva de remoção não atingiu o equilíbrio e novas análises sobre esses parâmetros devem ser realizadas a fim de se obter ganho de eficiência na remoção de fósforo pelo processo de adsorção utilizando nanopartículas magnéticas.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A habilidade da nanopartícula core@shell bimagnética $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ na adsorção de P já havia sido comprovada nas análises realizadas por Guerra *et al.* (2020), empregando solução aquosa enriquecida com fosfato. Para comprovar a aplicabilidade dessa tecnologia em efluentes reais, onde há a presença também de outras constituintes, procedeu-se com a realização de ensaios com o líquido clarificado de centrífuga da ETE Brasília Norte.

A escolha por esse efluente se deu pela elevada concentração de fósforo quando comparada aos demais efluentes da estação, chegando a apresentar valores acima de dez vezes aos do esgoto afluente à ETE. A eficiência de remoção de P por adsorção apresentou percentuais em torno de 40% o que, apesar de estar abaixo do valor encontrado nos estudos com solução aquosa, representa valor expressivo na massa de P que pode ser removida com a tecnologia.

Em relação aos parâmetros dos ensaios, notou-se que o pH exerce influência significativa na adsorção de P, de forma que para todas as condições testadas, a eficiência de remoção diminuiu com o seu aumento. Esse fator influenciou também no tempo de equilíbrio da solução, de maneira que o tempo máximo adotado nos ensaios não foi suficiente para atingi-lo no cenário com maior valor de pH, sendo recomendado o aumento do tempo de contato para análises futuras.

Já a dosagem das nanopartículas não apresentou indícios de ser um fator relevante no processo de adsorção, de forma que as menores dosagens, de 2,5 e 25 mg apresentaram valores semelhantes de remoção aos das maiores dosagens, de 50 e 75 mg. Assim, novas análises devem ser realizadas, a fim de se investigar parâmetros que influenciam de maneira significativa na remoção de P por adsorção com nanopartículas, obtendo condições que permitam o incremento da eficiência do processo.

Recomenda-se também testes para avaliar a capacidade de separação das nanopartículas carregadas de fósforo do meio e a sua posterior reutilização, o que contribuiria ainda mais com a sua aplicação em escala real no cenário das estações de tratamento de esgoto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23ª edição. Washington, E.U.A.
2. BELTRÃO, D. RIBEIRO, V. MOTA, A.M. BATISTA, L. AMORIM, A. Cargas de Fósforo na Ete Brasília Norte: Possibilidades de Recuperação e Impacto da Recirculação do Líquido Clarificado das Centrífugas. XX SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2022. Anais. Aveiro, 2022.
3. DRENKOVA-TUHTAN, A. SCHNEIDER, M., FRANZREB, M. MEYER, C. GELLERMANN, C. SEXTL, G. MANDEL, K. STEINMETZ, H. Pilot-scale removal and recovery of dissolved phosphate from secondary wastewater effluents with reusable ZnFeZr adsorbent @ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ particles with magnetic harvesting. Water Research, v. 109, p. 77-87, 2017.
4. FU, C. TRAN, H. CHEN, X. JUANG, R. Preparation of polyaminated Fe_3O_4 @chitosan core-shell magnetic nanoparticles for efficient adsorption of phosphate in aqueous solutions. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 83, p. 235-246, 2020.
5. GUERRA, A. A. CAMPOS, A. de LIMA, R. KERN, C. da SILVA, F. GOMIDE, G. DEPEYROT, J. AMORIM, A. Efficient uptake of phosphorus from water by core@shell bimagnetic nano-adsorbents". Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 103888, 2020.

6. GDF, Governo do Distrito Federal. Plano Distrital de Saneamento Básico e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Tomo IV - Produto 2, Empresa SERENCO LTDA. Brasília, 2017.
7. do NASCIMENTO, R. de LIMA, A. VIDAL, C. MELO, D. RAULINO, G. Adsorção: Aspectos Teóricos e Aplicações Ambientais. Imprensa Universitárias, Fortaleza, CE, 2014.
8. THOMANN, R. MUELLER, J. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper-Collins, 644 p. Nova Iorque, 1987.
9. TU, Y. YOU, C. Phosphorus adsorption onto green synthesized nano-bimetal ferrites: Equilibrium, kinetic and thermodynamic investigation. Chemical Engineering Journal, v. 251, p. 285-292, 2014.
10. VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgoto. Editora UFMG, 472 p. Belo Horizonte, MG, 2018.
11. XU, J. LUU, L. TANG, Y. Phosphate removal using aluminum-doped magnetic nanoparticles. Desalination and Water Treatment, v. XX, p. 1-10, 2016.