PROPOSTA TEÓRICA DE UM SISTEMA BIOFILTRANTE MODULAR PARA REMOÇÃO COMPLEMENTAR DE NITRATO E FOSFATO DA ÁGUA

Alice Corrá Dellú Machado, Kauane Mariana Rosa Nunes, Nicollas Pedro França Bianchi, Matheus Luiz Moreira do Amaral, Kemer Neves Zuri

Colégio UNIVAP - Unidade Centro/Técnico em Química, Rua Paraibuna, 75 - Jardim São Dimas, São José dos Campos - SP, 12245-020, Brasil, alicecdellu@gmail.com, kauane.nunes2008@gmail.com, nicollaspedro432@gmail.com, matheusluizmoreiraa@gmail.com, kemerzuri@gmail.com.

Resumo

O excesso de nitrato e fosfato em ambientes aquáticos está associado à eutrofização. Este trabalho teve como objetivo propor, com base em revisão narrativa da literatura, um sistema biofiltrante modular para o tratamento complementar de água contendo esses nutrientes. Dez artigos fundamentaram três módulos: decantação e pré-filtração para retenção de sólidos; etapa desnitrificante conceitual, com cascalho como suporte e cavacos de madeira como fonte de carbono para o biofilme; e cartucho reativo com limalha de ferro para contato com o fosfato. A análise indicou mecanismos compatíveis com as funções propostas, mas o sistema não foi construído nem testado. Assim, a literatura sustenta a continuidade do projeto, sem permitir estimar eficiência, custo, vida útil ou capacidade de potabilização.

Palavras-chave: Nitrato. Fosfato. Desnitrificação. Biofiltração. Remoção de nutrientes.

Área do Conhecimento: Técnico - Seção de trabalhos Ensino Médio/Ensino Médio Técnico.

Introdução

O nitrogênio e o fósforo presentes nos ambientes aquáticos podem ter origem em fontes difusas e pontuais, como o escoamento agrícola e o lançamento de efluentes. A contribuição de cada fonte varia conforme o uso do solo e as características da bacia hidrográfica (Crowson *et al.*, 2024). Quando o aporte desses nutrientes supera a capacidade de assimilação do ambiente, pode ocorrer eutrofização, com aumento da produção de biomassa e possível redução do oxigênio dissolvido durante sua decomposição (Pannard *et al.*, 2024). Assim, como o nitrato e o fosfato podem estar presentes simultaneamente na água, sua remoção pode exigir mecanismos complementares.

Biofiltros e *wetlands* construídos combinam materiais de preenchimento e comunidades microbianas em processos físicos, químicos e biológicos. O funcionamento desses sistemas é influenciado por pH, temperatura, carga hidráulica, tempo de detenção, disponibilidade de carbono e oxigenação (Rani *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024). A proposta deste trabalho foi organizada em três módulos: decantação e pré-filtração; etapa desnitrificante conceitual com cascalho e cavacos de madeira; e cartucho reativo com limalha de ferro.

Na desnitrificação, microrganismos reduzem o nitrato por etapas e, quando o processo é completo, formam N_2. Na via heterotrófica, a matéria orgânica fornece carbono e elétrons, enquanto concentrações elevadas de oxigênio dissolvido podem inibir o processo (Fu *et al.*, 2022; Moloantoa *et al.*, 2022). O biofilme não seria produzido pelos materiais: ele se formaria pela adesão e pelo crescimento de microrganismos presentes na água de alimentação ou introduzidos por um inóculo durante a partida do sistema. Esses organismos colonizariam o cascalho e os cavacos, que oferecem superfícies de fixação; os cavacos também liberariam carbono gradualmente (Lee *et al.*, 2023; Rani *et al.*, 2024). Como o módulo não foi testado, a origem do inóculo e o período necessário para a formação do biofilme ainda precisariam ser definidos. O cascalho teria função de suporte e distribuição do fluxo, não de agente desnitrificante (Yang *et al.*, 2024).

O ortofosfato dissolvido pode ocorrer principalmente como di-hidrogenofosfato ($H_2PO_4^-$) e hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}) em águas próximas da neutralidade, e a participação relativa dessas espécies varia com o pH. Esse parâmetro também interfere nas superfícies reativas e nos produtos de corrosão do ferro (Rani *et al.*, 2024). Limalhas, aparas e ferro zero-valente apresentam potencial de retenção do fosfato por adsorção e precipitação, mas o desempenho depende do preparo do material, do pH, do tempo de contato, da saturação e da passivação da superfície (Sleiman *et al.*, 2016; Ai *et al.*, 2023).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi propor, com base em revisão narrativa da literatura, um sistema biofiltrante modular para o tratamento complementar de água contendo nitrato e fosfato,

identificando a função prevista, a sustentação bibliográfica e as limitações de cada módulo. Nenhuma etapa foi construída ou ensaiada, e a proposta não se destina, por si só, à purificação ou à potabilização da água.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido como revisão narrativa da literatura e elaboração de uma proposta conceitual. As pesquisas se estenderam de maio a agosto de 2026 no Google Acadêmico. Entre as expressões utilizadas estavam "nitrate and phosphate water contamination", "constructed wetlands nitrogen phosphorus removal", "woodchip denitrifying bioreactor", "heterotrophic denitrification carbon source", "phosphate speciation pH" e "iron shavings phosphate removal", além de combinações equivalentes em português. Autoria, periódico, ano e DOI foram conferidos nas páginas dos periódicos, das editoras e de repositórios acadêmicos.

Foram priorizados artigos publicados a partir de 2022 e diretamente relacionados aos mecanismos ou aos materiais da proposta. Um estudo de 2016 foi mantido por investigar a retenção de fosfato em coluna com ferro zero-valente e areia. Foram excluídos trabalhos duplicados, sem identificação bibliográfica verificável ou sem contribuição direta para os módulos, de forma que dez artigos formaram a base principal, organizados em quatro temas: origem e efeitos dos nutrientes; estrutura e pré-tratamento; desnitrificação com fonte de carbono; e retenção de fosfato por materiais ferrosos.

A partir dessa comparação, foi elaborada uma configuração com três módulos. O módulo 1 reúne decantação e pré-filtração para retenção inicial de sólidos e redução de turbidez. O módulo 2 corresponde a uma etapa desnitrificante conceitual, na qual o cascalho e os cavacos atuariam como superfícies para a colonização microbiana, e os cavacos também forneceriam carbono. Os microrganismos poderiam vir da água de alimentação ou de um inóculo acrescentado na partida, possibilidade que ainda precisaria ser definida. O módulo 3 consiste em um cartucho com limalha de ferro destinado ao contato com o fosfato. Nenhum módulo foi construído ou testado, e não foram obtidos dados experimentais nem calculadas eficiências.

Para uma validação futura simplificada, o módulo 1 poderia ser avaliado por medidas de turbidez ou sólidos suspensos antes e depois da pré-filtração. No módulo 2, seria necessário definir a origem dos microrganismos, prever um período de colonização e realizar um ensaio separado em condição anóxica, com controle do tempo de detenção e análises de nitrato, nitrito e, quando possível, amônio. A diminuição isolada do nitrato seria considerada apenas um indício de transformação; a confirmação de sua conversão completa em N_2 exigiria um balanço de nitrogênio e/ou a análise dos produtos gasosos. Antes do uso no módulo 3, a procedência e a composição da limalha deveriam ser verificadas, assim como a possível presença de óleo, revestimentos ou outros resíduos. O material precisaria passar por preparo padronizado, com limpeza compatível com os resíduos encontrados, enxágue, secagem e separação por tamanho, registrando-se a massa e a condição da superfície. Depois desse preparo, uma solução de fosfato com concentração conhecida poderia permanecer em contato com massa definida de limalha durante tempo fixo, mantendo-se um controle sem ferro. O fosfato e o pH seriam medidos antes e depois do contato, e o ferro residual, ao final. Esses procedimentos são apenas sugestões para uma etapa posterior e não foram executados.

Resultados

A análise bibliográfica permitiu distinguir a função prevista, a base teórica e o limite de cada módulo. A Tabela 1 resume a configuração proposta e deixa explícito que nenhuma etapa foi avaliada experimentalmente.

Tabela 1 - Síntese conceitual dos módulos e de seus limites.

Módulo	Composição e função	Base teórica	Limite da proposta
1	Decantação e pré-filtração para retenção de sólidos	A sedimentação antes de *wetlands* integra sistemas de tratamento e reduz a carga de sólidos (Abdel-Shafy *et al.*, 2024)	Sem dimensionamento, construção ou medidas de turbidez e sólidos

Módulo	Composição e função	Base teórica	Limite da proposta
2	Cascalho e cavacos como suportes; cavacos como fonte de carbono; biofilme formado por microrganismos da água ou de inóculo	A desnitrificação depende dos microrganismos, do carbono e de condições anóxicas (Fu *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2023)	Origem do inóculo e colonização não definidas; não houve ensaio das formas de nitrogênio
3	Cartucho de limalha de ferro previamente verificada e preparada para contato com o fosfato	Materiais ferrosos podem reter fosfato por adsorção e precipitação associadas à corrosão (Sleiman *et al.*, 2016; Ai *et al.*, 2023)	Sem padronização do material ou ensaio de fosfato, pH e ferro residual

Fonte: elaborada pelos autores com base na literatura analisada.

Para o módulo 1, Abdel-Shafy *et al.* (2024) estudaram um sistema no qual a sedimentação antecedeu um *wetland* e contribuiu para a retenção de sólidos. Esse resultado sustenta a função física proposta, mas não permite transferir percentuais de remoção, pois o estudo utilizou água residuária e configuração diferentes das previstas neste trabalho.

Para o módulo 2, a literatura mostrou que o cascalho não deve ser descrito como agente desnitrificante. Substratos granulares oferecem sustentação física, ajudam na distribuição do fluxo e permitem a fixação do biofilme (Rani *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024). A comunidade microbiana teria de se originar da água de alimentação ou de um inóculo adicionado na partida e precisaria de tempo para colonizar os materiais. A transformação do nitrato dependeria dessa atividade microbiana, enquanto os cavacos poderiam fornecer parte do carbono necessário. Temperatura, oxigênio dissolvido, relação carbono/nitrogênio e tempo de detenção também precisariam ser definidos (Fu *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2023). Além disso, uma queda na concentração de nitrato não comprovaria, isoladamente, sua conversão completa em N_2, pois outras formas de nitrogênio poderiam permanecer no sistema (Moloantoa *et al.*, 2022).

Para o módulo 3, os estudos com limalhas, aparas e ferro zero-valente mostraram mecanismos de adsorção e precipitação relacionados aos produtos de corrosão. Esses trabalhos sustentam a escolha do material, mas não permitem prever o desempenho do cartucho proposto, porque utilizaram condições próprias de concentração, pH, preparo e tempo de contato (Sleiman *et al.*, 2016; Ai *et al.*, 2023). Por se tratar de um possível subproduto de usinagem, a limalha precisaria ter procedência e composição verificadas e ser inspecionada quanto à presença de óleo, revestimentos ou outros resíduos. Limpeza, secagem, faixa de tamanho e condição superficial deveriam ser padronizadas antes de qualquer comparação. A variação das espécies $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-} com o pH reforça a necessidade de acompanhar esse parâmetro em uma avaliação futura (Rani *et al.*, 2024).

Discussão

A divisão em módulos evita atribuir a um único material funções que dependem de mecanismos diferentes. O módulo 1 teria função principalmente física. No módulo 2, cascalho e cavacos ofereceriam superfícies de colonização, os cavacos também forneceriam carbono e os microrganismos da água ou de um inóculo formariam o biofilme responsável pela desnitrificação. No módulo 3, a interação entre fosfato e ferro dependeria de um material previamente verificado e preparado. Essa sequência constitui uma hipótese de funcionamento e não um sistema já desenvolvido.

A aplicação pretendida também precisa ser delimitada. A configuração foi pensada para o tratamento complementar de correntes aquosas contendo nutrientes, mas a concentração inicial, a presença de matéria orgânica, os íons concorrentes e a vazão ainda não foram definidos. Essas características podem alterar tanto a desnitrificação quanto a retenção de fosfato, de modo que não é possível generalizar a proposta para qualquer tipo de água.

O possível baixo custo se baseia no uso de cascalho, cavacos e limalha disponíveis localmente ou provenientes de subprodutos. Entretanto, não foi realizado levantamento de preços, e o custo real dependeria do preparo, da manutenção e da substituição dos materiais. Portanto, baixo custo deve ser tratado como critério de projeto, e não como vantagem econômica demonstrada.

A revisão sustenta o papel possível de cada componente, mas não demonstra a eficiência do conjunto. Entre os pontos que exigiriam verificação estão a origem e a maturação do biofilme, a colmatação, a liberação inicial de matéria orgânica, o esgotamento do carbono dos cavacos, o acúmulo de nitrito ou amônio, a saturação e a passivação do ferro e a possível liberação de ferro residual. A procedência, a composição e o preparo da limalha também precisariam ser padronizados. O pH deveria

ser acompanhado porque interfere tanto nas espécies de fosfato quanto nas reações da superfície ferrosa. Também seria necessário verificar se a saída de um módulo altera o funcionamento do seguinte.

Uma avaliação posterior poderia comparar a água na entrada e após cada módulo. No primeiro, seriam observados sólidos ou turbidez; no segundo, nitrato, nitrito e amônio, além de oxigênio dissolvido e tempo de detenção; e no terceiro, fosfato, pH e ferro residual. A redução do nitrato, sem balanço de nitrogênio ou análise de produtos gasosos, não permitiria afirmar que houve conversão completa em N_2. Mesmo que os nutrientes diminuíssem, o biofiltro não poderia ser descrito como responsável pela purificação ou potabilização da água, pois outros contaminantes e parâmetros de qualidade não foram considerados.

Conclusão

A revisão permitiu propor um sistema biofiltrante dividido em três módulos: retenção inicial de sólidos, etapa desnitrificante conceitual com cascalho e cavacos de madeira e cartucho reativo com limalha de ferro. O cascalho foi reconhecido como suporte, enquanto a desnitrificação foi atribuída a um biofilme que precisaria se formar a partir de microrganismos da água ou de um inóculo, na presença de carbono e em condições anóxicas. A diminuição do nitrato, isoladamente, não confirmaria sua conversão completa em N_2. Para o fosfato, a literatura indicou potencial de interação com materiais ferrosos, desde que a procedência e o preparo do material sejam controlados e o pH seja considerado.

O trabalho resultou em uma proposta conceitual fundamentada na literatura. Nenhum módulo foi construído ou testado, e não foram determinadas eficiência de remoção, vida útil, segurança operacional ou custo. A configuração pode orientar um protótipo futuro, desde que cada etapa seja avaliada separadamente e depois em conjunto, mas não permite afirmar que o sistema seja eficaz, economicamente viável ou capaz de potabilizar a água.

Referências

ABDEL-SHAFY, H. I. *et al.* Integrated treatment of black wastewater using sedimentation, constructed wetland, and nanoparticles coagulation. **Water Science and Technology**, v. 90, n. 7, p. 2029-2039, 2024. DOI: 10.2166/wst.2024.320. Disponível em: https://doi.org/10.2166/wst.2024.320. Acesso em: 23 ago. 2026.

AI, H. *et al.* Phosphate removal by low-cost industrial byproduct iron shavings: efficacy and longevity. **Water Research**, v. 246, art. 120745, 2023. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120745. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120745. Acesso em: 23 ago. 2026.

CROWSON, M. *et al.* Quantifying the relative importance of agricultural land use as a predictor of catchment nitrogen and phosphorus concentrations. **Science of the Total Environment**, v. 954, art. 176589, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176589. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176589. Acesso em: 23 ago. 2026.

FU, X. *et al.* Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: a review. **Science of the Total Environment**, v. 817, art. 153061, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153061. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153061. Acesso em: 23 ago. 2026.

LEE, S. *et al.* Denitrifying woodchip bioreactors: a microbial solution for nitrate in agricultural wastewater - a review. **Journal of Microbiology**, v. 61, n. 9, p. 791-805, 2023. DOI: 10.1007/s12275-023-00067-z. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12275-023-00067-z. Acesso em: 23 ago. 2026.

MOLOANTOA, K. M. *et al.* Nitrate water contamination from industrial activities and complete denitrification as a remediation option. **Water**, v. 14, n. 5, art. 799, 2022. DOI: 10.3390/w14050799. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w14050799. Acesso em: 23 ago. 2026.

PANNARD, A. *et al.* Why are there so many definitions of eutrophication? **Ecological Monographs**, v. 94, n. 3, e1616, 2024. DOI: 10.1002/ecm.1616. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ecm.1616. Acesso em: 23 ago. 2026.

RANI, A. *et al.* Microbiological dimensions and functions in constructed wetlands: a review. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, art. 100311, 2024. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100311. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100311. Acesso em: 23 ago. 2026.

SLEIMAN, N. *et al.* Phosphate removal from aqueous solution using ZVI/sand bed reactor: behavior and mechanism. **Water Research**, v. 99, p. 56-65, 2016. DOI: 10.1016/j.watres.2016.04.054. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.054. Acesso em: 23 ago. 2026.

YANG, L. *et al.* Technical structure and influencing factors of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 89, n. 2, p. 271-289, 2024. DOI: 10.2166/wst.2023.414. Disponível em: https://doi.org/10.2166/wst.2023.414. Acesso em: 23 ago. 2026.