

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

GABRIEL LIVIERI BARBOSA

**REMOÇÃO DE NUTRIENTES E MATÉRIA ORGÂNICA EM *WETLANDS TIDAL-
FLOW* E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REÚSO AGRÍCOLA**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2025

GABRIEL LIVIERI BARBOSA

**REMOÇÃO DE NUTRIENTES E MATÉRIA ORGÂNICA EM *WETLANDS TIDAL-
FLOW* E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REÚSO AGRÍCOLA**

Relatório final apresentado à Universidade
Federal de Viçosa como parte das exigências
para a obtenção do título de Engenheiro
Agrícola e Ambiental

Orientador: Alisson Carraro Borges

Coorientador: Eder Carlos Lopes Coimbra

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2025


GABRIEL LIVIERI BARBOSA

**REMOÇÃO DE NUTRIENTES E MATÉRIA ORGÂNICA EM WETLANDS TIDAL-
FLOW E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REÚSO AGRÍCOLA**


Relatório final apresentado à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 31 de janeiro de 2025.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL LIVIERI BARBOSA**
Data: 07/02/2025 11:35:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel Livieri Barbosa
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ALISSON CARRARO BORGES**
Data: 07/02/2025 11:59:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alisson Carraro Borges
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais e meu irmão;

aos meus amigos;

ao Eder, ao Lucas, às meninas do estágio, ao professor Alisson, ao Gil e ao pessoal do laboratório por me ajudarem neste trabalho.

RESUMO

As *Wetlands* Construídas *Tidal-Flow* (WC-TF) são uma tecnologia promissora pela sua alta capacidade de remoção de nitrogênio, por meio de nitrificação e desnitrificação. A fim de aprimorar essa tecnologia, objetivou-se com este estudo investigar como o tempo de repouso, o material de enchimento e a vegetação influenciam no desempenho de WC-TF na remoção de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal total (NAT), fósforo total (Pt), demanda química de oxigênio (DQOt), turbidez e sódio (Na); e também nas concentrações residuais de nitrogênio nitrato (N-NO_3^-) e na condutividade elétrica e pH finais no efluente. Além disso, objetivou-se determinar o potencial de reúso agrícola para o tipo de WC-TF de melhor desempenho. A pesquisa foi conduzida em 12 WC-TF em escala laboratorial, seguindo um delineamento com três fatores: a presença ou não de taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) (Fator I), o tempo de repouso de 3 h (Fator II), e a presença ou não de zeólita (Fator III). O afluente utilizado foi sintético, de fácil e rápido preparo, projetado para simular um tipo genérico de efluente, composto de ração de cachorro, whey protein e outros nutrientes. O desempenho das WC-TF foi avaliado utilizando-se uma análise de variância baseada em modelos lineares generalizados (ANOVA-MLG) e uma análise de agrupamento. A análise de variância mostra que os parâmetros NTK, NAT e Pt foram os únicos em que houve diferença significativa entre os reatores, mais influenciadas pelos fatores zeólita e repouso que pela vegetação. O reator que apresentou o melhor desempenho nos três parâmetros foi o submetido à vegetação, repouso e zeólita, resultando em remoções de $56,1 \pm 11,9\%$ de NTK, $25,4 \pm 19,4\%$ de NAT e $40,9 \pm 6,1\%$ de Pt. A análise de agrupamento mostrou que os três fatores influenciaram o agrupamento, mas os fatores zeólita e repouso foram mais determinantes que o fator vegetação, mostrando uma separação clara entre reatores com zeólita e com repouso dos seus opostos. O efluente do melhor WC-TF pode ser usado para fertirrigação. A relação I/R de 7:1, conjuntamente com o tempo de enchimento e esvaziamento afetou negativamente a remoção de NAT nos reatores sem zeólita. De modo geral, todos os fatores influenciaram no desempenho de WC-TF, entretanto os fatores zeólita e repouso foram mais influentes que o fator vegetação.

Palavras-chave: Alagados Construídos; Ciclos Alternados; Taioba; Meio Suporte.

ABSTRACT

Tidal-Flow Constructed Wetlands (TF-CW) are a promising technology due to their high nitrogen removal capacity through nitrification and denitrification. In order to improve this technology, the aim of this study was to investigate how the resting time, fill material and vegetation influence the performance of TF-CW in the removal of total Kjeldahl nitrogen (TKN), total ammoniacal nitrogen (TAN), total phosphorus (Pt), chemical oxygen demand (COD_t), turbidity and sodium (Na); and also, in the residual concentrations of nitrate nitrogen (N-NO₃-), and electrical conductivity and pH in the final effluent. In addition, the aim was to determine the agricultural reuse potential for the best performing TF-CW type. The research was conducted in 12 laboratory-scale TF-CW, following a three-factor design: the presence or absence of taro (*Xanthosoma sagittifolium*) (Factor I), the 3-h resting time (Factor II), and the presence or absence of zeolite (Factor III). The flood/rest ratio (I:R) was 7:1. The influent used was synthetic, easy and quick to prepare, designed to simulate a generic type of effluent, composed of dog food, whey protein and other nutrients. The performance of the TF-CW was evaluated using an analysis of variance based on generalized linear models (ANOVA-MLG) and a cluster analysis. The analysis of variance shows that the parameters NTK, TAN and Pt were the only ones in which there was a significant difference between the reactors, more influenced by the zeolite and rest factors than by the vegetation. The reactor that presented the best performance in the three parameters was the one subjected to vegetation, rest and zeolite, resulting in removals of $56.1 \pm 11.9\%$ of TKN, $25.4 \pm 19.4\%$ of TAN and $40.9 \pm 6.1\%$ of Pt. The cluster analysis showed that the three factors influenced the grouping, but the zeolite and rest factors were more determining than the vegetation factor, showing a clear separation between reactors with zeolite and with rest and their opposites. The effluent from the best TF-CW can be used for fertigation. The I/R ratio of 7:1, together with the filling and emptying time, negatively affected the NAT removal in the reactors without zeolite. In general, all factors influenced the TF-CW performance, however the zeolite and rest factors were more influential than the vegetation factor.

Keywords: Constructed Wetlands; Tidal-Flow; Taioba; Support Medium.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 7 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS..... | 10 |
| 2.1 Planta e Água Residuária..... | 10 |
| 2.2 Reatores e Delineamento Experimental | 10 |
| 2.3 Caracterização da Água Residuária e da Biomassa Vegetal | 13 |
| 2.4 Análises Estatísticas dos Dados..... | 13 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 15 |
| 3.1 Caracterização do Afluente | 15 |
| 3.2 Desempenho dos Reatores..... | 16 |
| 3.3 Análises de Agrupamento..... | 20 |
| 3.4 Potencial de Reúso para Fins Agrícolas | 22 |
| 4 CONCLUSÃO..... | 24 |
| REFERÊNCIAS | 25 |

1 INTRODUÇÃO

A falta de tratamento e a destinação inapropriada das águas residuárias representam um desafio de escala global e nacional. Mundialmente, cerca de 48% das águas residuárias não recebem tratamento (JONES et al., 2021). No Brasil, aproximadamente 47,8% dessas águas são despejadas no ambiente sem nenhum tratamento prévio (BRASIL, 2023). O país conta com pelo menos 3.668 estações de tratamento de esgoto (ETE), classificadas conforme o método utilizado: 37% empregam reatores anaeróbios, 35% utilizam lagoas, 10% operam com lodos ativados, e o restante adota processos mistos, simplificados ou não convencionais (BRASIL, 2020). Apesar das limitações de cada tipo de sistema quando usados isoladamente, essas restrições podem ser superadas por meio da combinação de tecnologias ou da integração com métodos alternativos de tratamento (VON SPERLING, 2014).

Um dos métodos alternativos de tratamento de águas são as *Wetlands* Construídas (WC), que surgiram na década de 1950, e foram amplamente difundidas a partir dos anos 1990, impulsionadas pela crescente preocupação ambiental (WEINHEIMER, 2015). Tradicionalmente, as WC são classificadas com base no tipo de escoamento: superficial ou subsuperficial, vertical ou horizontal, contínuo ou intermitente (MATOS; MATOS, 2017). As WC convencionais, de alimentação contínua, são eficazes na remoção de patógenos, matéria orgânica, sólidos dissolvidos totais e metais pesados, mas pouco eficazes na remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo (AMARAKOON, 2022). Para superar essa limitação, as *Wetlands* Construídas do tipo *Tidal-Flow* (WC-TF) foram desenvolvidas no final da década de 1990. Esses sistemas operam alternando fases de drenagem (condições aeróbias) e fases de inundação (condições anaeróbias), otimizando os processos biogeoquímicos envolvidos na remoção de poluentes (ZHENG et al., 2023b). As WC-TF apresentam, por exemplo, vantagens como alta taxa de remoção de nitrogênio, por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação (AMARAKOON, 2022; ZHENG et al., 2023b).

Nos sistemas WC-TF, espécies como *Phragmites australis* (SAEED et al., 2020), *Althernanthera philoxeroides* (ROTH et al., 2021) e *Oenanthe javanica* (CAO et al., 2022) têm sido comumente empregadas. No entanto, outras espécies como a taioba (*Xanthosoma sagittifolium*), apesar de demonstrarem resultados positivos em outros tipos de *Wetlands* (LÓPEZ-CHÁVEZ et al., 2021), permanecem subexploradas em WC-TF. A taioba é uma planta herbácea tuberosa, perene e comestível, amplamente apreciada na culinária brasileira, especialmente em Minas Gerais e Rio de Janeiro, sendo considerada uma planta alimentícia não convencional (PANC) (KINUPP; LORENZI, 2014).

Apesar dos avanços proporcionados pelas WC-TF em relação às WC convencionais, seu desempenho ainda pode ser aprimorado. Estudos recentes exploraram ciclos com diferentes materiais de enchimento e repouso, demonstrando resultados expressivos na eficiência de remoção de matéria orgânica, nutrientes e outros poluentes (LIAO et al., 2023; ROTH et al., 2021).

As WC-TF têm sido testadas com uma ampla variedade de material de enchimento em diferentes combinações, incluindo materiais orgânicos, como biocarvão, turfa e casca de pinheiro (CHAND; KUMAR; SUTHAR, 2022; FENG et al., 2023; SAEED et al., 2020; WDOWCZYK; SZYMAŃSKA-PULIKOWSKA; GAŁKA, 2022); materiais de construção civil, como cascalho, concreto, brita, areia, cerâmica e pó de pedra (SAEED; YADAV; MIAH, 2022; ZENG et al., 2022; ZHANG et al., 2021) e resíduos industriais, como lodo de alumínio e ferro, escória de aço e ferro-carbono (ZHAO et al., 2024; ZHOU et al., 2022; ZOU et al., 2022).

Dentre os materiais de enchimento minerais testados em WC-TF, a zeólita tem se destacado pelo excelente desempenho na remoção de poluentes (MA et al., 2023; ZHENG et al., 2023b). Trata-se de um mineral natural com estrutura altamente porosa e cristalina, composta por aluminossilicatos. Essa configuração confere à zeólita elevada capacidade de troca catiônica (CTC), tornando-a eficiente no desenvolvimento de biofilmes e, sobretudo, na remoção de nitrogênio amoniacal total (NAT) (MONTALVO et al., 2020). Nas WC *Tidal-Flow*, a remoção de nitrogênio ocorre da seguinte forma: na fase inundada, o íon amônio presente na água residuária é adsorvido pela zeólita; na fase de drenagem, esse amônio é nitrificado; e, na fase inundada do ciclo subsequente, o nitrogênio na forma de nitrato (N-NO_3^-) é desnitrificado, sendo produzido o nitrogênio gasoso (MA et al., 2023).

O período de repouso das *Wetlands* Construídas *Tidal-Flow* é um outro fator para o aprimoramento desses sistemas, pois contribui para a manutenção de condições redox, favorecendo a transferência de oxigênio, e assim, aumentando a eficiência na remoção de poluentes (LIAO et al., 2023; WANG et al., 2018). Estudos mostram que reatores WC-TF com tempos de repouso removem mais matéria orgânica e distribuem melhor os microrganismos do que os sem esse intervalo (HU; ZHAO; RYMSZEWICZ, 2014; LIAO et al., 2023). Liao et al. (2022), por exemplo, testaram diferentes relações de tempo de inundação/repouso (I/R) e observaram que o sistema com menor I/R (3:1) apresentou a menor concentração residual de demanda química de oxigênio (DQO) no efluente ($45,20 \text{ mg L}^{-1}$), em comparação ao grupo controle, sem repouso, que registrou $152,85 \text{ mg L}^{-1}$, partindo de um valor inicial de

500 mg L⁻¹. No entanto, o efeito sobre a remoção de NAT foi menor, com máxima redução de 64% (LIAO et al., 2022).

Diante do exposto, considerando o limitado número de estudos abordando os efeitos do tempo de repouso em *Wetlands Construídas Tidal-Flow*, apesar dos benefícios já relatados, e considerando a ampla aplicação da zeólita em contextos similares, torna-se relevante investigar a interação desses fatores no tratamento de águas residuárias. Hipotetiza-se que a combinação de zeólita com tempos de repouso mais longos resulta em maior eficiência na remoção de matéria orgânica e nutrientes como fósforo e formas nitrogenadas. Sendo assim, objetivou-se com este estudo investigar como diferentes tempos de repouso, combinados com diferentes materiais de enchimento e material vegetal, influenciam no desempenho de *Wetlands Construídas Tidal-Flow* na remoção de poluentes, tais como matéria orgânica e nutrientes. Além disso, determinar o potencial de reúso agrícola para o tipo de WC-TF de melhor desempenho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Planta e Água Residuária

A planta utilizada no experimento foi a taioba (*Xanthosoma sagittifolium*). As espécies foram coletadas em mudas uniformes na Área Experimental de Tratamento de Resíduos (AETR) do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, onde já funcionam experimentos com sistemas *Wetlands* Construídas. Antes de sua utilização, as plantas foram coletadas e lavadas cuidadosamente com água corrente para remover impurezas. Foram selecionadas apenas as plantas com características similares em tamanho, e após o seu plantio, todas elas foram podadas até uma altura de 5,0 cm a fim de garantir uma uniformidade das condições experimentais.

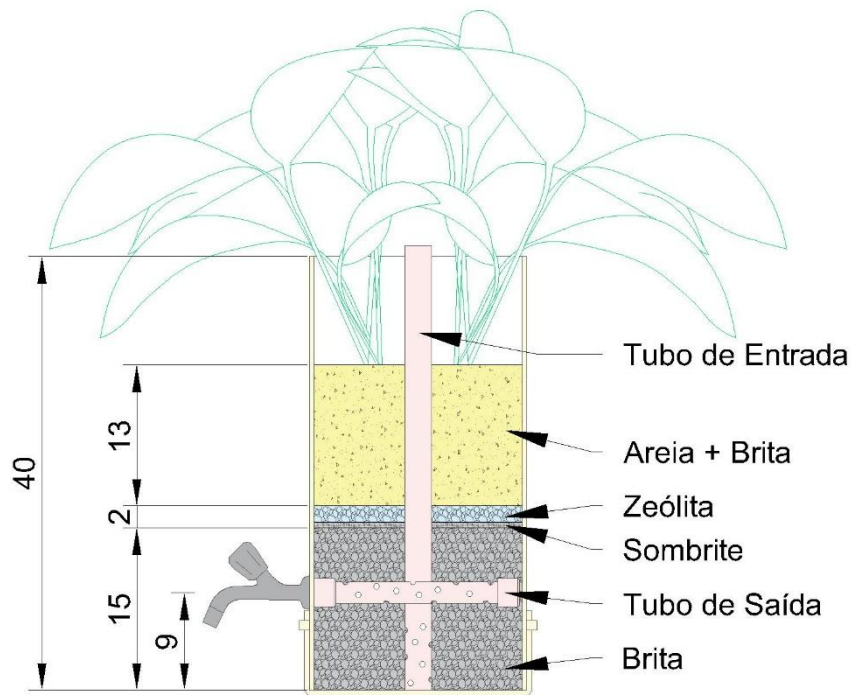
A água residuária utilizada foi do tipo sintética, adaptada de KARGOL et al. (2023), desenvolvida para simular compostos orgânicos e inorgânicos e replicar as características específicas das águas residuárias reais. Foi utilizado um afluente sintético, pois suas características físico-químicas e biológicas ao longo do experimento seriam praticamente constantes, diferentemente de um afluente real, no qual essas características variam ao longo dos dias. Para o seu preparo, uma solução concentrada era utilizada e depois diluída em 19,0 L de água deionizada. A solução concentrada, de 1,0 L, foi composta de 30,0 g de ração para cachorros Dog Chow® para filhotes, 3,0 g de *whey protein* da Parmalat®, 15,0 mL de fosfato monobásico de amônio ((NH₄)₂H₂PO₄) e 10,0 mL de cloreto de amônio (NH₄CL). Ao longo do presente texto, ela está designada como Água Residuária Sintética (ARS).

2.2 Reatores e Delineamento Experimental

As *Wetlands* Construídas do tipo *tidal-flow*, denominadas de reatores, foram construídas conforme um único modelo (Figura 1). Esse modelo é composto por um tubo de policloreto de vinila (PVC) com diâmetro de 200 mm e fundo fechado. A 9 cm do fundo, foi instalada uma torneira conectada a um tubo perfurado de ½” de diâmetro, disposto transversalmente ao reator. A altura da torneira separava o volume útil do volume morto (sempre saturado). Um tubo de ¾” de diâmetro, com sua extremidade inferior perfurada foi posicionado longitudinalmente de forma quase concêntrica ao reator. Entre todos os reatores, as camadas inferiores e superiores foram idênticas. Na camada inferior, foi colocada brita tamanho “0” com 15 cm de espessura a partir do fundo. Sobre essa camada, foi inserido um pedaço de sombrite dobrado ao meio,

formando uma dupla camada que atua como interface isolante com as camadas superiores, mas que não impede a passagem da água residuária. Na camada superior, foi adicionada uma mistura de areia de filtro e brita “número 0”, na proporção 1:1, completando a estrutura interna do reator. Nos reatores com zeólita, entre as duas camadas, foram adicionados 500 g de zeólita, formando uma fina camada de aproximadamente 1,5 cm (Figura 1).

Figura 1 - Representação esquemática do modelo das *Wetlands* Construídas *Tidal-Flow* (WC-TF)



Medidas em cm (fora de escala). Os reatores vegetados R1-2, R3-4 foram construídos com material de enchimento (brita, areia e zeólita) com (R1-2) e sem (R3-4) repouso. Os reatores vegetados R5-6, R7-8 foram construídos com material de enchimento (brita e areia) com (R5-6) e sem (R7-8) repouso. Os reatores não vegetados R9 e R10 foram construídos com brita, areia e zeólita com e sem repouso, respectivamente. Já os reatores R11 e R12, não vegetados, foram construídos com brita e areia com e sem repouso, respectivamente.

Fonte: Autor.

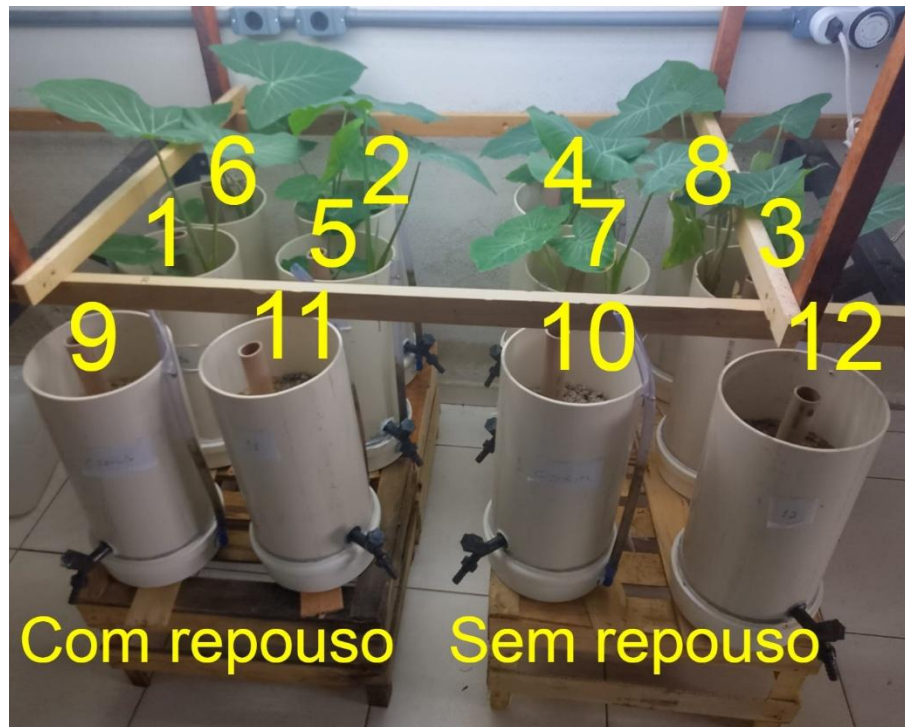
O experimento seguiu um delineamento com três fatores sendo eles a presença ou não de vegetação (Fator I), o tempo de repouso (Fator II), e o tipo de material de enchimento (Fator III) (Tabela 1). Portanto, foram testados reatores com ou sem zeólita, com ou sem repouso, e com ou sem vegetação. Os reatores vegetados foram construídos em réplicas, enquanto apenas uma unidade de cada um dos não vegetados foi testada, totalizando 12 tratamentos/reatores ao todo (Figura 2).

Tabela 1 – Condições operacionais dos reatores *Wetlands* Construídas *Tidal-Flow* (WC-TF)

| Fator I Vegetação | Fator II Repouso | Fator III Material de enchimento | Reatores (cópias) |
|----------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Com Vegetação | Com Repouso | Com Zeólita | R_1-2 |
| | | Sem Zeólita | R_5-6 |
| | Sem Repouso | Com Zeólita | R_3-4 |
| | | Sem Zeólita | R_7-8 |
| Sem Vegetação | Com Repouso | Com Zeólita | R_9 |
| | Sem Repouso | Sem Zeólita | R_11 |
| | | Com Zeólita | R_10 |
| | | Sem Zeólita | R_12 |

Os reatores com repouso referem-se a repouso de 3h no ciclo de 24h de operação. Os símbolos R_1-2, R_5-6, R_3-4, R_7-8 referem-se as duplicatas dos reatores vegetados (ver Figura 2). Já os não vegetados foram representados por unidade com os símbolos R_9, R_10, R_11 e R_12 (ver Figura 2).

Fonte: Autor.

Figura 2 - Reatores *Wetlands* Construídas *Tidal-Flow* (WC-TF)

R_9: reator não vegetado com repouso e com zeólita; R_11: reator não vegetado com repouso e sem zeólita; R_1-2: duplicatas 1 e 2, reatores vegetados com repouso e com zeólita; R_5-6: duplicatas 5 e 6, reatores vegetados com repouso e sem zeólita; R_10: reator não vegetado sem repouso e sem zeólita; R_12: reator não vegetado sem repouso e sem zeólita; R_3-4: duplicatas 3 e 4, reatores vegetados sem repouso e com zeólita; R_10: reator não vegetado sem repouso e sem zeólita; R_7-8: duplicatas 7 e 8, reatores vegetados sem repouso e sem zeólita.

Fonte: Autor.

O experimento foi conduzido na sala de reatores do Laboratório da Qualidade Ambiental (LQA) do DEA. A operação dos reatores foi adaptada de MAHARJAN; MORI; TOYAMA, (2020), no qual o ciclo foi de 24 h, sendo 3 h de repouso e 21 h de inundação,

consistindo numa relação inundação/repouso de 7/1. Neste experimento todos os reatores permaneciam inundados por 21 horas das 11 h às 8 h do dia seguinte. Às 8 h, todos os reatores eram esvaziados. Os reatores sem tempo de repouso eram imediatamente reabastecidos, para permanecerem inundados até o início do ciclo seguinte. Os reatores com tempo de repouso permaneciam 3 horas vazios. Às 11 h se iniciava um novo ciclo, no qual os reatores sem repouso eram esvaziados, e todos os reatores eram imediatamente reabastecidos. Ao fim de cada ciclo, os efluentes eram coletados, armazenados e caracterizados. A coleta das amostras de água, o enchimento e o esvaziamento duravam cerca de 2 min cada, por reator. Os reatores foram monitorados por 40 dias.

2.3 Caracterização da Água Residuária e da Biomassa Vegetal

O afluente (ARS) e o efluente de cada reator foram analisados quanto às suas características físicas e químicas utilizando os métodos padronizados (APHA, 2022). Foram realizadas determinações de DQO (método 5220D), fósforo total (TP) (4500-PB.4E), nitrogênio nitrato ($N-NO_3^-$) (método 4599- NO_3E), nitrogênio amoniacal total (NAT) (métodos 4500- NH_3 B e C), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) (4500-Norg C), condutividade elétrica (CE) (método 2510-B), pH (4500- H^+ , IntelliCAL™ PHC 101), turbidez (2130 B) e sódio (Na^+) (método 3500-Na). Ao final do experimento, nos reatores vegetados, as plantas foram coletadas e secas em uma estufa de fluxo de ar a 65 °C por 72 h até que uma massa constante fosse obtida (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

2.4 Análises Estatísticas dos Dados

Para avaliar o efeito dos tratamentos na melhoria da qualidade da água residuária, considerando a remoção ou concentração residual dos poluentes analisados, foi utilizada uma análise de variância (ANOVA) baseada em modelos lineares generalizados (MLG). Em seguida, foi aplicado, o teste *post-hoc* de Tukey a fim de identificar diferenças entre as médias de remoção ou concentração residual entre os tratamentos/reatores.

Além disso, uma análise multivariada foi conduzida por meio de agrupamento hierárquico (cluster), visando identificar padrões de similaridade entre os tratamentos/reatores com base na concentração residual dos parâmetros analisados. Para tanto, os dados foram previamente transformados utilizando a fórmula $\log_{10}(x + 1)$, onde x representa a média dos

parâmetros. Essa transformação teve como objetivo minimizar os efeitos das diferenças de escala e de unidades entre os parâmetros.

A análise de cluster foi realizada com os dados transformados, empregando o método de Ward para a formação dos grupos, utilizando a distância euclidiana como métrica de dissimilaridade. Em todas as análises, os níveis de significância foram fixados em valores de erro Tipo I menores que 0,05 (ou quando necessário em 0,10), e os *softwares* GraphPad Prism Versão 9.0, Minitab®, Microsoft Excel® e o mapa Origin® (versão de avaliação) foram utilizados para realizar as análises estatísticas e os gráficos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do Afluente

Na Tabela 2 estão dispostas as características físicas e químicas do afluente (ARS).

Tabela 2 – Caracterização física e química da Água Residuária Sintética (ARS)

| Parâmetros | Unidade | médias (\pm dp, n = 4 ^a) |
|--------------------------------|-------------------------|---|
| pH | - | 7,2 \pm 0,1 |
| Condutividade elétrica | μ S m ⁻¹ | 364,1 \pm 41,3 |
| Turbidez | uT | 372,7 \pm 56,7 |
| DQOt | mg L ⁻¹ | 1025,4 \pm 244,2 |
| NTK | mg L ⁻¹ | 53,6 \pm 5,3 |
| NAT | mg L ⁻¹ | 27,9 \pm 3,1 |
| N-NO ₃ ⁻ | mg L ⁻¹ | 13,2 \pm 1,5 |
| Pt | mg L ⁻¹ | 2,1 \pm 0,3 |
| Na | mg L ⁻¹ | 3,63 \pm 1,94 |

DQOt: demanda química de oxigênio total; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; NAT: nitrogênio amoniacal total; N-NO₃⁻: nitrogênio nitrato; Pt: fósforo total; Na: sódio; uT: unidade de turbidez; dp: desvio padrão.

^aPara sódio, n = 3.

Fonte: Autor.

Como se tratava de um afluente sintético simulando um tipo genérico de efluente agrícola (incluindo esgoto doméstico de áreas rurais) ou agroindustrial, nem todos os valores dos parâmetros analisados são típicos de um efluente específico. Com base nos valores médios de DQOt, NTK, NAT e Pt, e comparando-os com os valores encontrados em Matos e Matos (2017), se o foco deste estudo fosse simular uma água residuária de uma agroindústria, a ARS utilizada estaria mais próxima de se enquadrar como afluente de uma indústria de processamento de hortaliças, como ervilha, tomate ou cenoura, e também de afluente de polpação e branqueamento de celulose. Se o objetivo fosse simular uma água residuária bruta de criação de animais, ela se enquadraria como efluente de ricultura. A ARS também se enquadraria como esgoto doméstico, exceto pelos valores de N-NO₃⁻, cujo valor típico em esgoto doméstico varia de 0 a 1 mg L⁻¹ (VON SPERLING, 2014), ou seja, mais baixo que o encontrado na ARS.

Em relação ao artigo base do qual o afluente utilizado foi adaptado (KARGOL et al., 2023), a ARS é semelhante ao *Synthetic Primary effluent* em termos de pH e DQOt. Ambos têm pH próximo de 7,0, sendo o afluente do artigo um pouco mais alto. A DQOt média da ARS foi de 1025,4 mg L⁻¹, enquanto a do efluente do artigo foi de 1210 mg L⁻¹. A ARS apresentou maiores concentrações de nitrogênio, com NAT de 27,9 mg/L e N-NO₃⁻ de 13,2 mg/L,

comparado a 2,25 mg/L e 2,24 mg/L do efluente do artigo. Isso provavelmente se deve às diferentes marcas de ração e *whey protein*, além da adição de fosfato monobásico de amônio e cloreto de amônio na ARS. Outros parâmetros do artigo não foram comparáveis.

3.2 Desempenho dos Reatores

Na Tabela 3, estão listadas as concentrações residuais de N-NO₃⁻, condutividade elétrica e pH nos efluentes dos reatores, além da biomassa vegetal ao final do experimento. Os reatores R_7-8 e R_11 tiveram concentrações de N-NO₃⁻ semelhantes e menores que os demais, exceto R_10, que teve a maior concentração. A condutividade elétrica não variou significativamente entre os reatores. Em relação ao pH, apenas os reatores R_7-8 e R_9 mostraram diferença entre si. A biomassa vegetal após 40 dias não apresentou diferença significativa entre os reatores.

Tabela 3 – Concentração residual de nitrogênio nitrato (N-NO₃⁻), condutividade elétrica e pH final no efluente de cada reator (média ± dp, n = 6)

| ^a Reator | N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | Condutividade Elétrica (μS m ⁻¹) | pH - | Biomassa Vegetal (g) |
|---------------------|---|---|---------------|-------------------------|
| R_1-2 | 1,3 ± 0,5 ab | 734,3 ± 71,3 a | 6,25 ± 0,1 ab | 4,17 a |
| R_5-6 | 0,9 ± 0,4 ab | 763,5 ± 78,3 a | 6,24 ± 0,1 ab | 5,77 a |
| R_3-4 | 1,4 ± 0,5 ab | 769,2 ± 120,1 a | 6,12 ± 0,2 ab | 4,30 a |
| R_7-8 | 0,5 ± 0,9 b | 848,8 ± 171,5 a | 6,06 ± 0,1 b | 4,83 a |
| R_9 | 1,1 ± 0,2 ab | 714,5 ± 61,9 a | 6,29 ± 0,1 a | - |
| R_11 | 0,6 ± 0,7 b | 768,7 ± 87,0 a | 6,25 ± 0,1 ab | - |
| R_10 | 1,6 ± 0,3 a | 610,9 ± 290,7 a | 6,22 ± 0,1 ab | - |
| R_12 | 1,4 ± 0,4 ab | 764,5 ± 104,7 a | 6,19 ± 0,1 ab | - |

Médias, nas colunas, que não compartilham uma letra são significativamente diferentes segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ^a R_1-2 (Reator vegetado com repouso e zeólita), R_5-6 (Reator vegetado com repouso sem zeólita), R_3-4 (Reator vegetado sem repouso com zeólita), R_7-8 (Reator vegetado sem repouso sem zeólita), R_9 (Reator não vegetado com repouso e zeólita), R_11 (Reator não vegetado com repouso e sem zeólita), R_10 (Reator não vegetado sem repouso e com zeólita), R_12 (Reator não vegetado sem repouso e sem zeólita).

Fonte: Autor.

Na Tabela 4 estão dispostos os resultados de eficiência média de remoção de poluentes para cada tipo de tratamento/reator para os parâmetros DQOt, NTK, NAT, Pt, turbidez e sódio (Na).

Tabela 4 – Remoção percentual de demanda química de oxigênio (DQOt), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniaco total (NAT), fósforo total (Pt), turbidez e sódio (Na) nos reatores (média \pm dp, n = 6)

| Reator | DQOt | NTK | NAT | Pt | Turbidez | Na |
|-------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| Remoção (%) | | | | | | |
| R_1-2 | 63,6 \pm 10,4 a | 56,1 \pm 11,9 a | 25,4 \pm 19,4 a | 40,9 \pm 6,1 a | 89,6 \pm 3,9 a | -30,6 \pm 54,9 a |
| R_5-6 | 62,4 \pm 10,3 a | 25,9 \pm 12,6 bcd | -38,2 \pm 28,6 bcd | 36,7 \pm 11,1 ab | 88,7 \pm 3,9 a | -23,4 \pm 152,4 a |
| R_3-4 | 49,6 \pm 15,7 a | 38,6 \pm 13,6 abc | -2,0 \pm 22,3 abc | 30,1 \pm 13,0 ab | 88,7 \pm 2,7 a | 35,4 \pm 52,9 a |
| R_7-8 | 47,9 \pm 13,4 a | 5,1 \pm 16,5 d | -62,4 \pm 46,4 d | 19,5 \pm 13,5 b | 88,3 \pm 2,1 a | 48,9 \pm 9,4 a |
| R_9 | 65,8 \pm 8,7 a | 44,1 \pm 15,1 ab | 19,5 \pm 7,3 a | 38,5 \pm 8,8 ab | 92,2 \pm 2,2 a | 28,64 \pm 76,4 a |
| R_11 | 64,6 \pm 8,6 a | 19,2 \pm 11,6 cd | -47,7 \pm 33,0 cd | 31,5 \pm 13,4 ab | 88,3 \pm 2,9 a | -21,7 \pm 101,7 a |
| R_10 | 61,3 \pm 9,8 a | 46,2 \pm 11,7 ab | 11,9 \pm 23,9 ab | 32,9 \pm 13,7 ab | 90,3 \pm 1,6 a | -3,1 \pm 87,9 a |
| R_12 | 56,5 \pm 12,3 a | 23,6 \pm 16,8 bcd | -57,7 \pm 32,2 d | 24,6 \pm 7,9 ab | 87,9 \pm 2,1 a | -34,4 \pm 159,9 a |

Valores negativos indicam acúmulo e não remoção. Médias, nas colunas, que não compartilham uma letra são significativamente diferentes segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ^a R_1-2 (Reator vegetado com repouso e zeólita), R_5-6 (Reator vegetado com repouso sem zeólita), R_3-4 (Reator vegetado sem repouso com zeólita), R_7-8 (Reator vegetado sem repouso sem zeólita), R_9 (Reator não vegetado com repouso e zeólita), R_11 (Reator não vegetado com repouso e sem zeólita), R_10 (Reator não vegetado sem repouso e com zeólita), R_12 (Reator não vegetado sem repouso e sem zeólita).

Fonte: Autor.

Quanto à remoção de DQOt, turbidez e sódio os resultados não mostram diferença significativa entre os reatores, pois todos eles compartilham a mesma letra "a", indicando que a remoção foi estatisticamente equivalente entre todos eles.

Quanto à remoção de NTK, todos os reatores com zeólita (R_1-2, R_3-4, R_9 e R_10) compartilham a letra "a", sendo o único com apenas a letra "a" o reator R_1-2, de maior remoção (56,1 \pm 11,9%). Todos os reatores sem zeólita (R_5-6, R_7-8, R_11, R_12) compartilham a letra "d", sendo o R_7-8 o único com apenas a letra "d", apresentando a menor remoção (5,1 \pm 16,5%). O mesmo não acontece entre os reatores com e sem repouso, que não tendem a compartilhar uma letra em função do tratamento, o que indica que o fator zeólita tem

maior peso na diferenciação entre os reatores, em remoção de NTK, que o fator repouso. Também o mesmo não ocorre entre os reatores vegetados e não vegetados, apesar de que o fator vegetação aparenta ter ampliado a diferença significativa entre reatores com e sem zeólita. No tratamento com vegetação há diferença significativa entre todos os reatores com zeólita (R_1-2 e R_3-4) e sem zeólita (R_5-6 e R_7-8), enquanto no tratamento sem vegetação há diferença apenas entre o R_9 (com zeólita) e R_11 (sem zeólita), enquanto o R_10 (com zeólita) compartilha a letra “b” com o R_12 (sem zeólita), não apresentando diferença significativa entre eles.

Quanto à remoção de NAT, todos os reatores com zeólita compartilham a letra “a”, sendo os reatores R_1-2 e R_9 os únicos a compartilhar apenas a letra “a”, sendo os dois reatores de melhor desempenho. Todos os reatores sem zeólita compartilham a letra “d”, sendo os reatores R_7-8 e R_12 os únicos a compartilhar apenas a letra “d”, sendo os reatores de pior desempenho. O mesmo não acontece entre os reatores com e sem repouso, que não tendem a compartilhar uma letra em função do tratamento, o que indica que o fator zeólita tem maior peso na diferenciação entre os reatores; apesar de que o tratamento sem repouso tende a diminuir o desempenho dos reatores com zeólita, afastando-os do melhor resultado, R_1-2 (somente a letra “a”), e fazendo-os compartilhar a letra “b” e até a “c” (R_3-4). O fator vegetação não apresentou influência na diferenciação entre os reatores, diferentemente de alguns estudos que reportaram influência positiva da vegetação, tanto na capacidade do reator de nitrificar e desnitrificar (MAHARJAN; MORI; TOYAMA, 2020) quanto na remoção de nitrogênio total (SAEED; JIHAD MIAH, 2021).

Ainda quanto à remoção de NAT, o melhor reator apresentou uma remoção média de $25,4 \pm 19,4\%$ o que é relativamente baixa em comparação com outros estudos que reportaram remoção acima de 80% (MA et al., 2023; MAHARJAN; MORI; TOYAMA, 2020; ZHENG et al., 2023a). Como possível influência disso, está o fato de que os reatores sem zeólita (e também o R_3-4, com zeólita), e sobretudo os sem repouso (R_7-8 e R_12) apresentam valores de remoção negativos, ou seja, neles houve maior liberação de NAT em seus efluentes do que o que entrou pelo afluente. Uma possível justificativa para isso é que a zeólita pode ter adsorvido uma quantidade considerável de NAT durante o ciclo, tanto do afluente quanto dos produtos gerados pela biodegradação de DQOt, mas sua nitrificação foi insuficiente, ficando ele dissorvido na zeólita. E nos reatores sem zeólita, como seu material de enchimento não tem CTC expressiva, ou seja, nele não há tantos sítios de adsorção quanto na zeólita, todo esse NAT foi liberado no efluente, resultando em concentrações maiores de NAT do que as iniciais encontradas no afluente. Ademais, a nitrificação insuficiente pode ter impedido uma adequada

regeneração da zeólita de um ciclo para o outro, ocasionando em um baixo desempenho de remoção de NAT nos reatores com zeólita.

A possível causa para a nitrificação insuficiente nos reatores pode ter sido o curto intervalo de enchimento e esvaziamento entre os ciclos de tratamento, além da direção do fluxo. Isso pode ter reduzido e até mesmo impedido as vantagens da configuração *tidal-flow*, de enchimento e drenagem tipicamente mais lenta (AMARAKOON, 2022). No estudo de MA et al., (2023), no qual o enchimento durou 20 min e o esvaziamento durou 240 min, foi constatado que o enchimento descendente aumenta a nitrificação, enquanto que o enchimento ascendente aumenta a desnitrificação. Como neste experimento não houve alimentação descendente e nem grandes intervalos de enchimento e esvaziamento, apenas cerca de 2 min para cada reator, a nitrificação pode ter sido afetada. Seria necessário um tempo maior entre a troca de água de um ciclo para o outro, tal como no experimento de HU; ZHAO; RYMSZEWICZ, (2014), em que um salto de 10 min para 30 min ocasionou um aumento de 43 para 70% de eficiência de remoção de NAT.

Quanto à remoção de Pt, houve diferença significativa apenas entre os reatores R_1-2, de maior desempenho ($40,9 \pm 6,1\%$) e R_7-8, de pior desempenho ($19,5 \pm 13,5$). O fator vegetação aparenta ter ampliado a diferença significativa entre reatores com e sem repouso e com e sem zeólita. No tratamento com vegetação há diferença significativa entre os reatores com repouso e com zeólita (R_1-2) e sem repouso e sem zeólita (R_7-8), enquanto no tratamento sem vegetação não há diferença estatística entre nenhum reator. Além disso, nos reatores com vegetação, o tratamento sem repouso tendeu a diminuir o desempenho dos reatores com zeólita, afastando-os do resultado de R_1-2 (somente letra “a”) e fazendo-os compartilhar a letra “b”, já nos reatores sem vegetação isso não acontece.

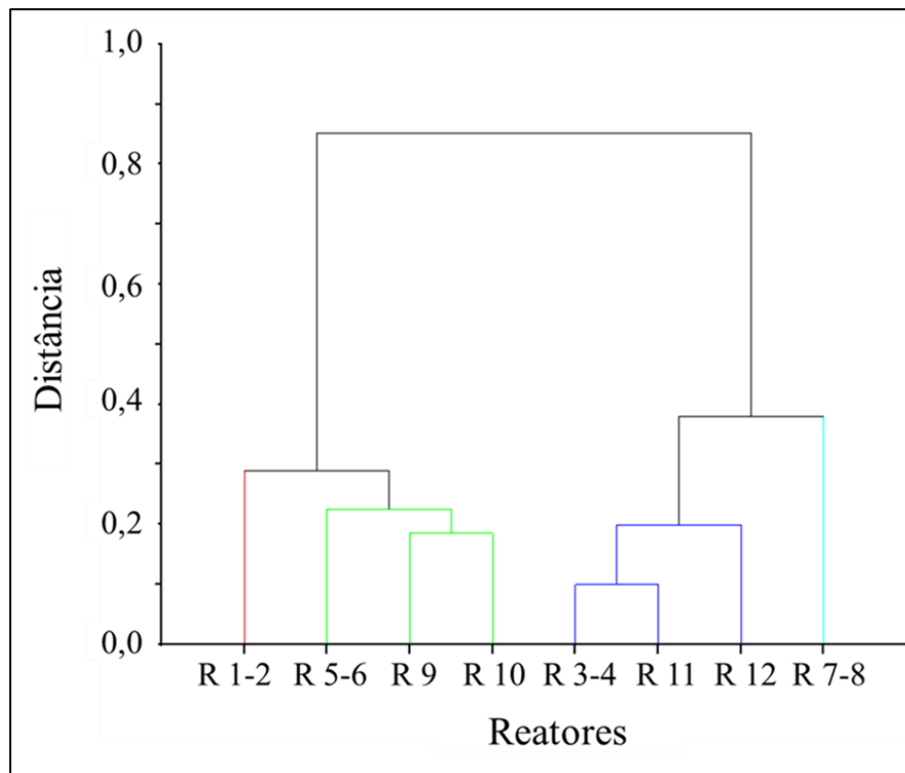
Na literatura há poucos estudos que relacionem esses dois fatores (tempo de repouso e zeólita) com Pt, mas que corroboram com os resultados aqui apresentados. Quanto à zeólita, recentemente foi constatado que a zeólita tem boa capacidade de adsorção de íons fósforo ($P-PO_4^{3-}$) quando usada como substrato em *Wetlands tidal flow*; no entanto, essa capacidade tende a diminuir ao longo do tempo devido à saturação dos seus sítios de adsorção (JU et al., 2014). Essa diminuição não foi observada neste experimento, provavelmente pelo tempo de monitoramento, de apenas 40 dias. Em outro estudo constatou-se que as comunidades microbianas nos reatores com zeólita apresentavam uma maior abundância de microrganismos com funções de remoção de fósforo em comparação com reatores sem zeólita (MA et al., 2023).

Quanto ao tempo de repouso, Liao et al. (2023) afirma que a fase de repouso proporciona um ambiente aeróbico que favorece o crescimento de espécies de microrganismos eficientes na remoção de fósforo sob condições aeróbias.

3.3 Análises de Agrupamento

A fim de comparar padrões de similaridades nas concentrações residuais entre os reatores foi realizado uma análise de agrupamento conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Dendrograma construído utilizando a análise de agrupamento hierárquica a partir dos dados de concentração ou valor final dos parâmetros: demanda química de oxigênio (DQOt), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal total (NAT), nitrogênio nitrato (N-NO_3^-), fósforo total (Pt), turbidez, sódio (Na), condutividade e pH final dos efluentes de cada reator



R_1-2 (Reator vegetado com repouso e zeólita), R_5-6 (Reator vegetado com repouso sem zeólita), R_3-4 (Reator vegetado sem repouso com zeólita), R_7-8 (Reator vegetado sem repouso sem zeólita), R_9 (Reator não vegetado com repouso e com zeólita), R_11 (Reator não vegetado com repouso e sem zeólita), R_10 (Reator não vegetado sem repouso e com zeólita), R_12 (Reator não vegetado sem repouso e sem zeólita). As cores indicam os clusters finais atribuídos pelo método hierárquico (Ward + distância euclidiana).

Fonte: Autor.

Como mostra a Figura 5, os reatores foram agrupados em quatro clusters principais, refletindo semelhanças nos padrões dos parâmetros analisados. O Cluster 1 é formado apenas pelo reator R_1-2 (vegetado, com repouso, e com zeólita). O que indica que a combinação positiva dos três fatores gera diferença suficiente para afastá-lo dos reatores que compartilham outra combinação. Isso se reflete no seu desempenho na remoção de poluentes (tabela 4) e nas menores concentrações residuais (tabela 3) dos parâmetros analisados, configurando-o quase sempre como o melhor reator.

O cluster 2 é formado pelos reatores R_5-6, R_9 e R_10, sendo os dois últimos mais similares entre si. Há maior nível de similaridade entre R_9 e R_10, ambos não vegetados e com zeólita, porém um com repouso e outro sem, indicando que o fator zeólita e vegetação, nesse caso, tem maior impacto na similaridade entre reatores que o fator repouso. No mesmo grupo, porém compartilhando menor similaridade com os outros dois, está o reator R_5-6 (com vegetação, com repouso e sem zeólita), cuja presença de repouso pode tê-lo aproximado do reator R_9, que compartilha esse mesmo fator.

O cluster 3 é formado pelos reatores R_3-4 (vegetado, com repouso e sem zeólita), R_11 (não vegetado, com repouso e sem zeólita) e R_12 (não vegetado, sem repouso e sem zeólita). Os reatores R_3-4 e R_11 apresentam maior similaridade entre si em relação ao R_12 (sendo também a maior similaridade do dendrograma), mesmo sendo contrários em termos de tratamento. Isso indica que a combinação de fatores contrários pode ter causado um efeito semelhante neste caso, anulando os efeitos discriminantes que cada fator teria isoladamente. No mesmo grupo, mas compartilhando menor similaridade com os outros dois, está o reator R_12, que compartilha as mesmas condições com o R_11, exceto pela ausência ou presença de repouso. Neste caso não é possível atribuir esse agrupamento a um fator específico e nem a uma combinação específica.

Por fim, o Cluster 4 é formado exclusivamente pelo reator R_7-8 (vegetado, sem repouso e sem zeólita). O reator R_7-8 se distinguiu dos demais, sobretudo do reator R_1-2. Em relação ao R_1-2 ele apresentou maior dissimilaridade que o reator R_12, que é totalmente contrário ao reator R_1-2 em termos de fatores. Porém, o R_7-8 é contrário ao R_1-2 somente em dois fatores, a saber zeólita e repouso. Isso indica que, nesse caso, os fatores repouso e zeólita são mais influentes que o fator vegetação. Esse agrupamento pode ser explicado pelo seu desempenho na remoção dos poluentes (Tabela 4) e concentrações residuais dos parâmetros analisados (Tabela 3), configurando-o quase sempre como o pior reator.

De forma geral, a figura 5 indica que os três fatores analisados influenciaram a formação dos clusters, com certa evidência de que o fator zeólita e o fator repouso são mais determinantes

para o agrupamento dos reatores que o fator vegetação. Isso pode ser percebido na disposição dos clusters na Figura 5: os clusters à esquerda são compostos quase todos por reatores com zeólita e com repouso, enquanto os da direita, quase todos por reatores sem zeólita e sem repouso. O que corrobora isso é o fato de que os clusters mais distintos entre si serem compostos por reatores contrários em termos desses dois fatores; a saber os reatores R 1-2 e R 7-8, ambos vegetados, mas um com presença dos dois fatores (R 1-2) e o outro sua completa ausência (R 7-8).

3.4 Potencial de Reúso para Fins Agrícolas

Dado que o tratamento com vegetação, repouso e zeólita (R_1-2) apresentou desempenho promissor na remoção de poluentes, este seria o tratamento recomendado para reatores em escala plena. Com base nos princípios da economia circular, que enfatizam a reutilização de recursos e a minimização de desperdícios, é essencial designar uma destinação final apropriada para os efluentes dos reatores WC-TF como a fertirrigação. De acordo com Matos e Matos (2017), a dose de aplicação de água residuária na fertirrigação depende dos constituintes da água residuária e de outras variáveis, como a textura do solo, o tipo de aplicação (superfície, aspersão ou gotejamento), além das necessidades e limites de toxicidade da cultura fertirrigada. Ainda conforme Matos e Matos (2017), a dose de aplicação é calculada pela equação 1.

$$D_{ref} = (Q_{ref})/C_{disp} \quad (1)$$

Em que:

- D_{ref} = estimativa da dose a ser aplicada ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);
- Q_{ref} = quantidade requerida ou aceitável do elemento de referência (nutriente/polvente) ($kg \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);
- C_{disp} = concentração disponibilizável pela água residuária a ser aplicada ($mg \text{ L}^{-1}$).

Aplicando essa fórmula para cada parâmetro da Tabela 2, a exceção de DQOt, é possível estimar qual é a dose máxima de aplicação para qualquer quantidade requerida. Como exemplo, pode ser feita para a cultura do milho, cuja produtividade média na safra 2024/25 foi de cerca de $5,7 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2024). Para essa produtividade, segundo MATOS; MATOS (2017), a

remoção total de N e P pelas plantas seria em torno de 70 kg ha⁻¹ e 12,8 kg ha⁻¹, respectivamente. Ainda segundo o autor, a dose máxima de aplicação de Na no solo é de 300 kg ha⁻¹ ano⁻¹. As concentrações médias de NTK, Pt e Na para o reator R_1-2 foram de 23,1 mg L⁻¹, 1,24 mg L⁻¹ e 4,0 mg L⁻¹, respectivamente. A partir dessas informações, a dose máxima de fertirrigação do efluente é dada na Tabela 5.

Tabela 5 – Dose de aplicação máxima do efluente do reator R_1-2 (vegetado, com repouso e com zeólita) para fertirrigação

| Elemento referencial | Concentração disponibilizável (C_{disp}) (mg L ⁻¹) | Quantidade de referência (Q_{ref}) (kg ha ⁻¹) | Dose máxima (D_{ref}) (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|----------------------|--|---|--|
| NTK | 23,1 | 70 | 3030,3 |
| Pt | 1,24 | 12,8 | 10322,6 |
| Na | 4,0 | 300 | 75000,0 |

NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl, Pt: fósforo total, Na: sódio.

Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Tabela 5, a dose máxima de aplicação ficou limitada pelo nitrogênio (NTK), em 3030,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Caso esse volume anual demandado não seja suprido pelo sistema de tratamento, o efluente pode ser usado conjuntamente com a adubação, como suplemento, e com a irrigação, se houver. Como os efluentes demonstraram conter predominantemente nitrogênio orgânico e amoniacal, e como não foram feitas análises de nitrogênio total, em seu lugar foi considerado o NTK como parâmetro de nitrogênio total para fins de fertirrigação.

4 CONCLUSÃO

De modo geral, todos os fatores influenciaram no desempenho de WC-TF, entretanto os fatores zeólita e repouso foram mais influentes que o fator vegetação. Da análise de variância, constata-se que entre os reatores não houve diferença significativa na remoção de DQOt, turbidez e Na, apenas na remoção de NTK, NAT e Pt. Essa diferença está correlacionada, sobretudo, com o fator zeólita e repouso, enquanto o fator vegetação teve um impacto menor e não significativo em alguns casos. O reator que apresentou melhor desempenho na remoção desses três parâmetros combinou vegetação, repouso e zeólita. Na análise de agrupamento constatou-se que a zeólita e repouso são mais determinantes para o agrupamento dos reatores do que a vegetação. O efluente do reator de melhor desempenho pode ser utilizado para a fertirrigação de culturas comerciais, como milho, feijão e forrageiras. Nos reatores sem zeólita houve mais NAT no efluente que no afluente em decorrência, provavelmente ao curto intervalo de enchimento e esvaziamento entre os ciclos de tratamento. Por isso, recomenda-se que futuras investigações considerem a otimização do ciclo diário, diminuindo a relação I/R para abaixo de 7:1, a direção do escoamento, e o tempo de enchimento e esvaziamento de WC-TF a fim de otimizar a remoção de poluentes da água.

REFERÊNCIAS

- AMARAKOON, A. M. S. N. A Review on the Development , Mechanism and the Applications of the Tidal Flow Constructed Wetland Systems. n. Icst, p. 110–118, 2022.
- APHA. Standard Method for Examination of Water and Wastewater. **APHA/AWWA/WEF: Washington, USA**, 2022.
- BRASIL. **Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos**. [s.l: s.n.]. v. 53
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental-SNSA. Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto. Visão Geral ano de referência 2022. p. 107, 2023.
- CAO, X. et al. Effects of iron-based substrate on coupling of nitrification, aerobic denitrification and Fe(II) autotrophic denitrification in tidal flow constructed wetlands. **Bioresource Technology**, v. 361, p. 127657, out. 2022.
- CHAND, N.; KUMAR, K.; SUTHAR, S. Enhanced wastewater nutrients removal in vertical subsurface flow constructed wetland: Effect of biochar addition and tidal flow operation. **Chemosphere**, v. 286, p. 131742, jan. 2022.
- CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira 2023/2024. **Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB)**, v. 11, n. 2318 6852, p. 110, 2024.
- FENG, L. et al. Performance and mechanisms of biochar-based materials additive in constructed wetlands for enhancing wastewater treatment efficiency: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 471, p. 144772, set. 2023.
- HU, Y.; ZHAO, Y.; RYMSZEWICZ, A. Robust biological nitrogen removal by creating multiple tides in a single bed tidal flow constructed wetland. **Science of The Total Environment**, v. 470–471, p. 1197–1204, fev. 2014.
- JONES, E. R. et al. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 2, p. 237–254, 8 fev. 2021.
- JU, X. et al. How the novel integration of electrolysis in tidal flow constructed wetlands intensifies nutrient removal and odor control. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 605–613, out. 2014.
- KARGOL, A. K. et al. Synthetic wastewater prepared from readily available materials: Characteristics and economics. **PLOS Water**, v. 2, n. 9, p. e0000178, 20 set. 2023.
- KHAJAH, M. et al. Nitrogen removal performance and bacterial community analysis of a multistage step-feeding tidal flow constructed wetland. **Frontiers in Water**, v. 5, 23 fev. 2023.

- KINUPP, V. F.; LORENZI, H. **Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) no Brasil - Gui de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas**. São Paulo, Brazil: Instituto Plantarum de Estudos da Flora LTDA, 2014.
- LIAO, Y. et al. Efficient removal mechanism and microbial characteristics of tidal flow constructed wetland based on in-situ biochar regeneration (BR-TFCW) for rural gray water. **Chemical Engineering Journal**, v. 431, p. 134185, mar. 2022.
- LIAO, Y. et al. The importance of rest phase and pollutant removal mechanism of tidal flow constructed wetlands (TFCW) in rural grey water treatment. **Chemosphere**, v. 311, p. 137010, jan. 2023.
- LÓPEZ-CHÁVEZ, M. Y. et al. Glyphosate-remediation potential of selected plant species in artificial wetlands. **Science of The Total Environment**, v. 781, p. 146812, ago. 2021.
- MA, R. et al. Efficient removal of nitrogen from tidal flow constructed wetlands based on the in-situ zeolite regeneration: Measures and mechanisms. **Chemical Engineering Journal**, v. 458, p. 141298, fev. 2023.
- MAHARJAN, A. K.; MORI, K.; TOYAMA, T. Nitrogen Removal Ability and Characteristics of the Laboratory-Scale Tidal Flow Constructed Wetlands for Treating Ammonium-Nitrogen Contaminated Groundwater. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1326, 7 maio 2020.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.
- MATOS, A. T.; MATOS, M. . **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. Viçosa-MG, Brasil: Editora UFV, 2017.
- MONTALVO, S. et al. Application of zeolites for biological treatment processes of solid wastes and wastewaters – A review. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122808, abr. 2020.
- ROTH, J. J. et al. Influence of the flooded time on the performance of a tidal flow constructed wetland treating urban stream water. **Science of The Total Environment**, v. 758, p. 143652, mar. 2021.
- SAEED, T. et al. Pollutant removal employing tidal flow constructed wetlands: Media and feeding strategies. **Chemical Engineering Journal**, v. 382, p. 122874, fev. 2020.
- SAEED, T.; JIHAD MIAH, M. Organic matter and nutrient removal in tidal flow-based microbial fuel cell constructed wetlands: Media and flood-dry period ratio. **Chemical Engineering Journal**, v. 411, p. 128507, maio 2021.
- SAEED, T.; YADAV, A. K.; MIAH, M. J. Treatment performance of stone dust packed tidal flow electroactive and normal constructed wetlands: Influence of contact time, plants, and electrodes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 50, p. 103257, dez. 2022.

- VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed ed. [s.l.] Editora UFMG, 2014.
- WANG, T. et al. Assessment of a Field Tidal Flow Constructed Wetland in Treatment of Swine Wastewater: Life Cycle Approach. **Water**, v. 10, n. 5, p. 573, 28 abr. 2018.
- WDOWCZYK, A.; SZYMAŃSKA-PULIKOWSKA, A.; GAŁKA, B. Removal of selected pollutants from landfill leachate in constructed wetlands with different filling. **Bioresource Technology**, v. 353, p. 127136, jun. 2022.
- WEINHEIMER, I. Wastewater Treatment using Tidal Flow Wetlands Bachelor of Civil Engineering (Honours). n. October, 2015.
- ZENG, Y. et al. Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency and Denitrification Kinetics of Different Substrates in Constructed Wetland. **Water**, v. 14, n. 11, p. 1757, 30 maio 2022.
- ZHANG, M. et al. Efficient nitrogen removal pathways and corresponding microbial evidence in tidal flow constructed wetlands for saline water treatment. **Environmental Research**, v. 234, p. 116548, out. 2023.
- ZHANG, Q. et al. Effects of hydraulic loading rate and substrate on ammonium removal in tidal flow constructed wetlands treating black and odorous water bodies. **Bioresource Technology**, v. 321, p. 124468, fev. 2021.
- ZHAO, L. et al. Iron-carbon micro-electrolysis facilitates autotrophic denitrification and Feammox in tidal flow constructed wetlands for enhanced nitrogen removal and reduced N₂O emissions. **Chemical Engineering Journal**, v. 486, p. 150367, abr. 2024.
- ZHENG, H. et al. Performance and mechanism of falling water enhanced tidal flow constructed wetlands (F-TFCW) for rural grey water treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 404, p. 136969, jun. 2023a.
- ZHENG, X. et al. Effect of macroporous zeolite substrate on denitrification in tidal flow constructed wetland. **Environmental Technology & Innovation**, v. 32, p. 103424, nov. 2023b.
- ZHOU, M. et al. The performance and mechanism of iron-modified aluminum sludge substrate tidal flow constructed wetlands for simultaneous nitrogen and phosphorus removal in the effluent of wastewater treatment plants. **Science of The Total Environment**, v. 847, p. 157569, nov. 2022.
- ZOU, Y. et al. Effect of steel slag on ammonia removal and ammonia-oxidizing microorganisms in zeolite-based tidal flow constructed wetlands. **Chemosphere**, v. 309, p. 136727, dez. 2022.