ANAIS

REMOÇÃO DE NUTRIENTES E MATÉRIA ORGÂNICA EM WETLANDS TIDAL-FLOW ENRIQUECIDAS COM ZEÓLITA

GABRIEL LIVIERI
gabriel.livieri@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

EDER CARLOS LOPES COIMBRA
eder.coimbra@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

LUCAS RAFAEL LOMMEZ VAZ
lucas.lommez@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

AMANDA MEDEIROS ARAUJO
amanda.m.araujo@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ALISSON CARRARO BORGES
borges@ufv.br
UFV

RESUMO: As Wetlands Construídas Tidal-Flow (WC-TF) são uma tecnologia promissora pela sua alta capacidade de remoção de nitrogênio, via processos de nitrificação e desnitrificação. A fim de aprimorar essa tecnologia, objetivou-se com este estudo investigar o efeito do tempo de repouso, do material de enchimento e da vegetação no desempenho de WC-TF sobre os parâmetros nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal total (NAT), fósforo total (Pt), demanda química de oxigênio (DQO), turbidez; nitrato (N-NO3-), condutividade elétrica e pH. 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), repouso de 3 h ou sem repouso (Fator II) e a presença ou não de zeólita (Fator III). A relação inundação/repouso (I:R) foi de 7:1. Os reatores foram alimentados com água residuária sintética produzida com ração de cachorro, whey protein e outros nutrientes. O desempenho das WC-TF foi avaliado utilizando-se uma análise de variância para o esquema fatorial e teste de Tukey. Os fatores zeólita e repouso foram os que individualmente mais influenciaram nas variáveis resposta, mas a vegetação apresentou interação significativa com o fator repouso para DQO, NTK e NO3-. O tempo de repouso de 3h não foi suficiente para promover adequadamente os processos de nitrificação e desnitrificação, o que refletiu na remoção global de NAT. As wetlands construídas do tipo tidal flow apresentaram desempenho satisfatório na redução da carga orgânica e de nutrientes, sendo uma alternativa simples e de baixo custo para o tratamento de efluentes onde se há limitação de recursos tecnológicos, financeiros e humanos.

PALAVRAS CHAVE: Alagados Construídos; Ciclos Alternados; Taioba; Meio Suporte

ABSTRACT: Tidal-Flow Constructed Wetlands (TFCW) are a promising technology due to their high nitrogen removal capacity, through nitrification and denitrification processes. In order to enhance this technology, this study aimed to investigate how the retention time, filling material, and vegetation influence the performance of TFCW on total Kjeldahl nitrogen (TKN), total ammoniacal nitrogen (TAN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD), turbidity, nitrate (N-NO3-), electrical conductivity, and pH. An assay with 12 laboratory-scale TFCW in a factorial design was developed considering the presence or absence of Xanthosoma sagittifolium (Factor I), a 3-hour rest and no rest (Factor II), and the presence or absence of zeolite (Factor III). The flooding/rest ratio (F:R) was 7:1. The reactors were fed with synthetic wastewater produced with dog food, whey protein, and other nutrients. The performance of the TFCW systems was evaluated using an analysis of variance for the factorial scheme and Tukey's test. The zeolite and rest factors were the ones that individually influenced the response variables the most, but vegetation showed a significant interaction with the rest factor for COD,

TKN, and NO3-. The 3-hour rest was not sufficient to adequately support nitrification and denitrification processes, which reflected in the overall removal of TAN. The tidal-flow constructed wetlands showed satisfactory performance in reducing organic loads and nutrients, being a simple and low-cost alternative for wastewater treatment where there are limitations in technological, financial, and human resources.

KEY WORDS: Constructed Wetlands; Tidal-Flow; Xanthosoma sagittifolium; zeolite

1. INTRODUÇÃO

As técnicas convencionais de tratamento de água e efluentes são, de uma forma geral, processos onerosos e complexos que geram resíduos difíceis de se gerenciar (lodos). Com isso, há uma demanda crescente por métodos alternativos descentralizados que sejam mais econômicos, menos complexos, com boa eficiência e, não menos importante, de fácil acesso.

As estratégias de fitorremediação, como as wetlands construídas (WC), despontam como alternativas aos tratamentos convencionais com vantagens de serem esteticamente mais agradáveis, além de serem consideradas uma tecnologia mais limpa e mais barata. As WC têm configurações variadas, mas um sistema conhecido como *tidal flow* tem superado as expectativas em relação à sua capacidade de promover processos de nitrificação e desnitrificação. Este sistema se baseia em operações de enchimento e esvaziamento dos leitos simulando um regime de marés (*tide*), havendo, assim, um período de contato do efluente com o meio poroso e subsequente drenagem e repouso do reator, onde ocorre oxigenação do sistema e mineralização da matéria orgânica.

As wetlands construídas do tipo tidal-flow (WC-TF) têm ganhado notoriedade. A busca, dessa forma, por novas estratégias de operação para potencializar ainda mais seu desempenho se concentram em testar diferentes tempos de enchimento e esvaziamento, espécies de plantas e materiais de enchimento. As zeólitas, por exemplo, são aluminossilicatos com elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e alta afinidade por íons de amônio e tem sido vastamente investigada no tratamento de águas. 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.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

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. 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, 2023). 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 (VYMAZAL, 2022). 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 pouco exploradas 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 materiais de enchimento em diferentes combinações, incluindo materiais orgânicos, como biocarvão, turfa e casca de pinheiro (CHAND et al., 2022; FENG et al., 2023; SAEED et al., 2020; WDOWCZYK et al., 2022); materiais de construção civil, como cascalho, concreto, brita, areia, cerâmica e pó de pedra (SAEED et al., 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-TF, 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 ($N\text{-}NO3^-$) 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). Pesquisadores relatam que reatores WC-TF com tempos de repouso removem mais matéria orgânica e distribuem melhor os microrganismos do que os sem esse intervalo (HU et al., 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 demanda química de oxigênio (DQO) no efluente (45,20 mg L^{-1}), em comparação ao grupo controle, sem repouso, que registrou 152,85 mg L^{-1}, partindo de um valor inicial de 9 500 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. Sendo assim, objetivou-se com este estudo investigar como diferentes tempos de repouso, materiais de enchimento e, ainda, material vegetal influenciam no desempenho de wetlands construídas tidal flow na remoção de matéria orgânica e nutrientes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Planta e água residuária

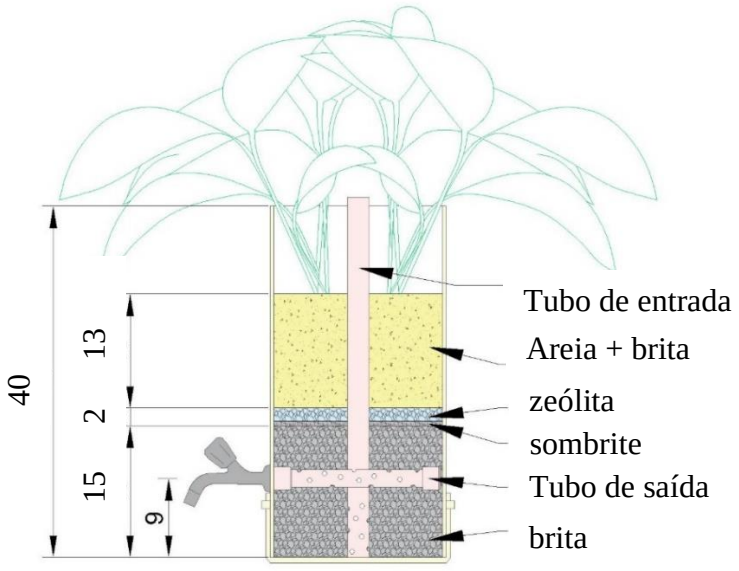
Mudas uniformes de *Xanthosoma sagittifolium* (taioba) foram coletadas em área de experimentação onde já se realizam pesquisas com sistemas de wetlands construídas. Foram selecionadas plantas similares em tamanho, e após o seu plantio, todas foram podadas a uma altura de 5,0 cm a fim de se garantir uniformidade das condições experimentais.

A água residuária sintética (ARS), adaptada de KARGOL et al. (2023), foi desenvolvida para simular compostos orgânicos e inorgânicos e replicar as características específicas de águas residuárias reais. Para tal, uma solução concentrada de 1 L era preparada e então diluída para 20 L de água deionizada. A solução concentrada foi composta de 30,0 g de ração para cachorros Dog Chow® para filhotes, 3,0 g de *whey protein* da Parmalat®, fosfato monobásico de amônio ($(NH_4)2H_2PO_4$) e cloreto de amônio (NH_4Cl), de forma que o volume final apresentou, em média, pH=7,2; condutividade elétrica de 364,1 µS m^{-1}; turbidez de 372,7 uT e, em mg L^{-1}, DQO=1025,4; NTK=53,6; NAT=27,9; N-NO_3^-=13,2; P_t=2,1 e Na=3,63.

3.2. Reatores e delineamento experimental

As wetlands construídas do tipo tidal flow, denominadas de reatores, foram construídas em 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 (Figura 1). 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. Na camada inferior, foi colocada brita "número 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 impedia a passagem da água residuária. Na camada superior, foi adicionada uma mistura de areia de filtro e brita "n° 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. Representação esquemática das wetlands construídas tidal flow (WC-TF).



Fonte: dos autores

TABELA 1. Condições operacionais dos reatores wetlands construídas tidal Flow (WC-TF).

Fator I Vegetação	Fator II Repouso	Fator III Material de enchimento	Reatores
Com Vegetação	Com Repouso	Com Zeólita	R1-2
		Sem Zeólita	R5-6
	Sem Repouso	Com Zeólita	R3-4
		Sem Zeólita	R7-8
Sem Vegetação	Com Repouso	Com Zeólita	R9
		Sem Zeólita	R11
	Sem Repouso	Com Zeólita	R10
		Sem Zeólita	R12

Os reatores com repouso referem-se a repouso de 3h no ciclo de 24h de operação. Os símbolos R1-2, R5-6, R3-4, R7-8 referem-se as duplicatas dos reatores vegetados. Já os não vegetados foram representados por unidade com os símbolos R9, R10, R11 e R12. Fonte: dos autores.

3.3. Caracterização da água residuária

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 ($N\text{-}NO_3^-$) (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).

3.4. Análise estatística

Para avaliar o efeito dos tratamentos na qualidade final da água residuária, considerando a remoção ou concentração residual dos poluentes analisados, realizou-se análise de variância (ANOVA) do esquema fatorial no programa SISVAR (versão 5.8). Primeiramente, as variáveis resposta foram submetidas ao teste de Shapiro-Wilk (α=0,05) para verificação de normalidade para, em seguida, aplicar-se teste de F e, se fosse o caso, o teste *post-hoc* de Tukey (α=0,05).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pH médio dos efluentes dos reatores apresentaram valores próximos entre si (6,06 a 6,29) e menores que o afluente (7,2), ao passo que a condutividade elétrica aumentou para valores entre 610,9 e 848,8 µS m^{-1}. Já a remoção percentual dos outros parâmetros de monitoramento está apresentada na Tabela 2.

Apenas a interação entre os fatores vegetação e repouso promoveram efeitos sobre algumas variáveis resposta (Tabela 3). No caso, a 5% de significância para NTK e $N\text{-}NO_3^-$ e a 10% para DQO. Para outras respostas não se observou efeito significativo em nenhuma das interações, embora constataram-se efeitos independentes.

O repouso promoveu residuais estatisticamente menores de fósforo e amônio e, ainda, valores de pH ligeiramente mais neutros em comparação a sistemas sem repouso. Por sua vez, a presença de zeólita implicou em menores valores de condutividade elétrica, turbidez, fósforo, NTK e amônio, o que não ocorreu para o nitrato, em que na presença desse material observou-se concentração residual estatisticamente mais elevada.

TABELA 2. Remoção percentual média da demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal total (NAT), nitrogênio-nitrato ($N\text{-}NO_3^-$), fósforo total (Pt) e turbidez acompanhada de desvio padrão.

Reator	DQO	NTK	NAT	$N\text{-}NO_3^-$	Pt	Turbidez
R1-2	63,6 ± 10,4	56,1 ± 11,9	25,4 ± 19,4	9,8 ± 3,8	40,9 ± 6,1	89,6 ± 3,9
R5-6	62,4 ± 10,3	25,9 ± 12,6	-38,2 ± 28,6	6,8 ± 3,0	36,7 ± 11,1	88,7 ± 3,9
R3-4	49,6 ± 15,7	38,6 ± 13,6	-2,0 ± 22,3	10,6 ± 3,8	30,1 ± 13,0	88,7 ± 2,7
R7-8	47,9 ± 13,4	5,1 ± 16,5	-62,4 ± 46,4	3,8 ± 6,8	19,5 ± 13,5	88,3 ± 2,1
R9	65,8 ± 8,7	44,1 ± 15,1	19,5 ± 7,3	8,3 ± 1,5	38,5 ± 8,8	92,2 ± 2,2
R11	64,6 ± 8,6	19,2 ± 11,6	-47,7 ± 33,0	4,5 ± 5,3	31,5 ± 13,4	88,3 ± 2,6
R10	61,3 ± 9,8	46,2 ± 11,7	11,9 ± 23,9	12,1 ± 2,3	32,9 ± 13,7	90,3 ± 1,6
R12	56,5 ± 12,3	23,6 ± 16,8	-57,7 ± 32,2	10,6 ± 3,0	24,6 ± 7,9	87,9 ± 2,1

Valores negativos indicam acúmulo e não remoção. Fonte: dos autores.

As remoções de NAT foram baixas em comparação com outros estudos que reportaram valores acima de 80% (MA et al., 2023; MAHARJAN et al., 2020; ZHENG et al., 2023a). Os reatores sem zeólita e sobretudo os sem repouso apresentaram valores de remoção negativos, ou seja, neles houve maior liberação de NAT em seus efluentes do que a quantidade aplicada via afluente. A zeólita pode ter adsorvido uma quantidade considerável de NAT durante o ciclo, tanto do afluente quanto dos produtos gerados pela biodegradação de DQO, mas sua nitrificação foi insuficiente, o que pode ter impedido uma adequada regeneração da zeólita entre um ciclo outro e ocasionado esse baixo desempenho.

TABELA 3. Efeitos dos fatores e suas interações sobre as variáveis resposta para 5% (**) e 10% (*) de significância para o teste de Tukey.

Fonte de variação	pH	CE	Turbidez	DQO	Pt	NTK	NH_4	$N\text{-}NO_3^-$
Vegetação				**				
Repouso	**			**	**	**	**	
Zeólita		*	**		**	**	**	**
Veg*Rep				*		**		**
Veg*Zeo								
Rep*Zeo								
Veg*Rep*Zeo								

Fonte: dos autores.

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 escoamento. Isso pode ter reduzido e até mesmo impedido as vantagens da configuração tidal flow, de enchimento e drenagem tipicamente mais lenta (AMARAKOON, 2022). Nos estudos 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 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 et al. (2014), em que um salto de 10 min para 30 min ocasionou um aumento de 43 para 70% de eficiência de remoção de NAT.

TABELA 4. Quadro de comparação de médias da interação dos fatores vegetação e repouso para demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e nitrogênio-nitrato (NO_3^-) após análise de variância com teste de Tukey.

	DQO (ρ≤0,10)		
	Com Vegetação	Sem vegetação	média
Com Repouso	369,97 Aa	342,79 Aa	356,38
Sem repouso	491,54 Bb	385,16 Aa	438,35
média	430,75	363,97	397,36
	NTK (ρ≤0,05)		
Com Repouso	33,11Aa	37,87 Aa	35,49
Sem repouso	44,46 Bb	37,87 Aa	41,16
média	38,78	37,87	38,32
	$N\text{-}NO_3^-$ (ρ≤0,05)		
Com Repouso	1,14 Aa	0,90 Aa	1,02
Sem repouso	1,00 Aa	1,46 Bb	1,23
média	1,07	1,18	1,12

Médias seguidas de letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey. Fonte: dos autores.

O efeito independente da vegetação não promoveu diferenciação estatística para a maioria dos parâmetros, em contraste com o que foi observado por Maharjan et al. (2020). Entretanto, a sua interação com o fator repouso foi significativa para DQO, NTK e $N\text{-}NO_3^-$. Em sistemas com repouso de 3 h, a presença ou ausência da taioba foi indiferente, ao passo que nos sistemas sem repouso a presença da planta implicou em residuais maiores de DQO e NTK, mas menores para $N\text{-}NO_3^-$ (Tabela 4). Por outro lado, entre os sistemas sem a taioba, passar ou não pelo repouso não gerou valores diferentes de DQO, nem NTK, mas entre os sistemas plantados, os que repousavam apresentaram maiores remoções para ambos. Já para nitrato, sistemas não vegetados apresentaram residuais menores quando havia repouso de 3 h em seus respectivos ciclos, indicando que o nitrogênio nitrificado foi desnitrificado com mais eficiência, ao passo que na presença das plantas de taioba, ter ou não ter repouso foi indiferente. Nesses sistemas plantados, a falta do repouso pode ter sido compensada pela assimilação de nitrato por parte da planta que também enriquece e diversifica a microbiota do meio, favorecendo processos de desnitrificação e equiparando os resultados (SOANA et al., 2020).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, todos os fatores influenciaram no desempenho das WC-TF, entretanto os fatores zeólita e repouso foram individualmente mais influentes que o fator vegetação. Entretanto, a vegetação apresentou efeito interativo com o repouso em parâmetros importantes como a matéria orgânica, representada pela demanda química de oxigênio, e o nutriente nitrogênio.

A zeólita, um material com elevada capacidade de troca catiônica, de fato contribuiu para maiores reduções na condutividade elétrica, turbidez, fósforo, NTK e amônio, embora para este último parâmetro, o tempo curto de repouso pode não ter sido o suficiente para permitir remoções mais pronunciadas por dificultar os processos de nitrificação e desnitrificação.

Ainda assim, as wetlands construídas do tipo tidal flow apresentaram desempenho satisfatório na redução da carga orgânica e de nutrientes, sendo uma alternativa simples e de baixo custo para o tratamento de efluentes onde se há limitação de recursos tecnológicos, financeiros e humanos.

6. REFERÊNCIAS

AMARAKOON, A. M. S. N. A Review on the Development, Mechanism and the Applications of the Tidal Flow Constructed Wetland Systems. **ICST**, p. 110–118, 2022.

APHA. **Standard Method for Examination of Water and Wastewater**. APHA/AWWA/WEF: Washington, USA, 2022.

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.; ZHENG, H.; LIAO, Y.; FENG, L.; JIANG, L.; LIU, C.; MAO, Y.; SHEN, Q.; ZHANG, Q.; JI, F. 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.

FENG, L.; GAO, Z.; HU, T.; HE, S.; LIU, Y.; JIANG, J.; ZHAO, Q.; WEI, L. 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.; VAN VLIET, M. T. H.; QADIR, M.; BIERKENS, M. F. P. 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.

KARGOL, A. K.; BURREL, S. R.; CHAKRABORTY, I.; GOUGH, H. L. Synthetic wastewater prepared from readily available materials: Characteristics and economics. **PLOS Water**, v. 2, n. 9, p. e0000178, 20 set. 2023.

KINUPP, V. F.; LORENZI, H. **Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) no Brasil - Guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas**. São Paulo, Brazil: Instituto Plantarum de Estudos da Flora LTDA, 2014.

LIAO, Y.; JIANG, L.; CAO, X.; ZHENG, H.; FENG, L.; MAO, Y.; ZHANG, Q.; SHEN, Q.; JI, F. 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.; WAN, Z.; CAO, X.; JIANG, L.; FENG, L.; ZHENG, H.; JI, H. 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.; ALVAREZ-LEGORRETA, T.; INFANTE-MATA, D.; DUNN, M. F.; GUILLÉN-NAVARRO, K. Glyphosate-remediation potential of selected plant species in artificial wetlands. **Science of The Total Environment**, v. 781, p. 146812, ago. 2021.

MA, R.; MA, J.; CHEN, Y.; ZHUO, Y.; CHENG, L.; JIANG, L.; MAO, Y.; SHEN, Q.; LIU, C.; JI, F. 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.

MATOS, A. T.; MATOS, M. **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. Viçosa-MG, Brasil: Editora UFV, 2017.

MONTALVO, S.; HUILIÑIR, C.; BORJA, R.; SÁNCHEZ, E.; HERRMANN, C. 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.; PASSIG, F. H.; ZANETTI, F. L.; PELISSARI, C.; SEZERINO; P. H.; NAGALLI, A.; CARVALHO, K. Q. 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.; MIAH, M. J.; KHAN, T.; OVE, A. Pollutant removal employing tidal flow constructed wetlands: Media and feeding strategies. **Chemical Engineering Journal**, v. 382, p. 122874, fev. 2020.

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.

SOANA, E.; GAVIOLI, A.; VINCENZI, F.; FANO, E. A.; CASTALDELLI, G. Nitrate availability affects denitrification in *Phragmites australis* sediments. **Journal of Environmental Quality**. v. 49, n. 1, p. 194-209, 2020. DOI: 10.1002/jeq2.20000

VYMAZAL, J. The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. **Land**. v. 11, n. 2, 174, 2022. https://doi.org/10.3390/land11020174

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed ed. [s.l.] Editora UFMG, 2014.

WANG, T.; LIU, R.; O'MEARA, K.; MULLAN, E.; ZHAO, Y. 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.

ZENG, Y.; XU, W.; WANG, H.; ZHAO, D.; DING, H. 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, Q.; YANG, Y.; CHEN, F.; ZHANG, L.; RUAN, J.; WU, S.; ZHU, R. 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.; ZHENG, Y.; WANG, Z.; ZHANG, D.; MA, D.; ZHAO, Y.; WANG, X. C.; CHEN, R.; DZAKPASU, M. Iron-carbon micro-electrolysis facilitates autotrophic denitrification and Feammox in tidal flow constructed wetlands for enhanced nitrogen removal and reduced N_2O emissions. **Chemical Engineering Journal**, v. 486, p. 150367, abr. 2024.

ZHENG, H.; LIAO, Y.; CHAI, H.; ZHAO, L.; CAO, X.; FENG, L.; JI, F. 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.