

REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM WETLANDS COSTRUÍDOS DE FLUXO VERTICAL COM FUNDO SATURADO

Carine Baggiotto – cbaggiotto@unisc.br

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Programa de pós-graduação em Tecnologia Ambiental - PPGTA

Av. Independência, 2293 - Universitário, 96815-900, Santa Cruz do Sul – RS.

Marciano Friedrich – marci.esa@gmail.com

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Programa de pós-graduação em Tecnologia Ambiental - PPGTA

Samara Terezinha Decezaro – samara.decezaro@ufsm.br

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental – DETA

Carlos Alexandre Lutterbeck - carlosalexandre@unisc.br

Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Programa de pós-graduação em Tecnologia Ambiental - PPGTA

Delmira Beatriz Wolff - delmira-wolff.dw@ufsm.br

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA

Resumo:

Os wetlands construídos de fluxo vertical com fundo saturado (WCFV-FS) têm se destacado como uma alternativa eficaz e sustentável para o tratamento de águas residuais. Este estudo avalia a eficácia dos WCFV-FS na remoção de matéria orgânica, focando na Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A estação de tratamento de esgotos experimental operou tratando aproximadamente 1500 L.d⁻¹ através de um tanque séptico com volume de 4,7 m³, seguido de um WCFV-FS com uma área superficial de 24,5 m². O sistema contém espécies ornamentais de *Canna x generalis*. Os dados mostraram uma eficiência média de remoção de 97% entre a entrada de esgoto bruto e a saída do WCFV-FS, de 91% entre a saída do tanque séptico e o efluente final do WCFV-FS. Estes resultados indicam que os WCFV-FS são altamente eficazes na redução da carga orgânica em águas residuais. A pesquisa destaca a robustez e a consistência dos WCFV-FS, sugerindo que são uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de águas residuais. Deste modo, conclui-se que a adoção de WCFV-FS pode contribuir significativamente para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em áreas rurais ou como opção de sistema descentralizado de tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Tratamento descentralizado; saturação parcial; efluente doméstico; eficiência de remoção.

Abstract: Vertical flow constructed wetlands with a saturated bottom (VFCW-SB) have emerged as an effective and sustainable alternative for wastewater treatment. This study evaluates the effectiveness of VFCW-SB in the removal of organic matter, focusing on Biological Oxygen Demand (BOD). The experimental wastewater treatment plant operated by treating approximately 1500 L.d⁻¹ through a septic tank with a volume of 4.7 m³, followed by a VFCW-SB with a surface area of 24.5 m². The system contains ornamental species of *Canna x generalis*. The data showed an average removal efficiency of

Realização

ABES-RS

PUCRS

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL



abes-rs@abes-rs.org.br

(51) 999330700

www.abes-rs.org.br



97% between the raw sewage inflow and the VFCW-SB outflow, and 91% between the septic tank outflow and the final effluent of the VFCW-SB. These results indicate that VFCW-SB are highly effective in reducing the organic load in wastewater. The research highlights the robustness and consistency of VFCW-SB, suggesting that they are a sustainable and efficient alternative for wastewater treatment. Therefore, it is concluded that the adoption of VFCW-SB can significantly contribute to the sustainable management of water resources, especially in rural areas or as a decentralized wastewater treatment system option.

Keywords: Decentralized treatment; partial saturation; domestic effluent; removal efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Os *wetlands* construídos (WC) ganharam reconhecimento como um método sustentável e eficaz para tratamento de águas residuais, alavancando processos naturais para remover poluentes (YADAV et al., 2022). Entre as várias configurações, os *wetlands* construídos de fluxo vertical (WCFV) destacam-se como alternativa interessante para o tratamento de matéria orgânica, particularmente na forma de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pois esta configuração aumenta a eficiência do tratamento ao criar um ambiente favorável para processos microbianos aeróbicos e anaeróbicos (DOTRO et al., 2021).

A matéria orgânica em águas residuais, representada pela DBO, representa um desafio ambiental considerável. Altos níveis de DBO podem levar à depleção de oxigênio em corpos d'água, afetando negativamente a vida aquática e a qualidade geral da água (CHAPRA et al., 2021). Os métodos convencionais de tratamento de águas residuais, embora eficazes, geralmente envolvem custos operacionais elevados, destacando-se considerável consumo de energia (SANGAMNERE et al., 2023). Em contraste, Dawen e Nabi (2024) afirmam que os WCFV oferecem uma alternativa econômica e ambientalmente adequada, utilizando os efeitos sinérgicos do substrato, vegetação e atividade microbiana para degradar poluentes orgânicos.

Estudos recentes destacaram a eficiência dos WCFV na remoção de matéria orgânica. Por exemplo, a pesquisa de Nguyen et al. (2023) demonstrou que esses sistemas podem atingir uma redução substancial de até 90% de DBO. Além disso, Tanner et al. (2020) enfatizaram a importância da seleção do substrato e das espécies de plantas para melhorar o desempenho geral do tratamento de WCFV.

A utilização de uma zona saturada em WCFV, constituindo os *wetlands* construídos de fluxo vertical com fundo saturado (WCFV-FS), desempenha um papel crucial no processo de tratamento. Ela cria um ambiente anóxico que facilita a remoção de nitrogênio e de matéria orgânica por meio de processos como desnitrificação e digestão anaeróbica (DOTRO et al., 2021). Estudos mostraram que manter uma zona saturada melhora a eficiência geral da remoção de DBO ao promover uma comunidade microbiana diversa capaz de degradar uma ampla gama de compostos orgânicos (VYMAZAL, 2011).

Assim, este artigo tem como objetivo explorar os mecanismos e a eficiência da remoção de matéria orgânica, com foco na DBO, em *wetlands* construídos de fluxo vertical com zonas saturadas. Ao revisar avanços e estudos de caso recentes, este estudo busca fornecer uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam a remoção de DBO e propor estratégias operacionais e de projeto otimizadas para desempenho aprimorado do tratamento em WCFV-FS.

2. METODOLOGIA

A unidade experimental está localizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Ela está instalada em anexo à estação de tratamento de esgoto construída em escala real, destinada ao tratamento de esgoto doméstico proveniente da Casa de Estudantes Universitários II (CEU II) da UFSM. A unidade experimental fez parte de um projeto nacional denominado Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados (RENTED), que foi

Realização



ABES-RS

PUCRS



abes-rs@abes-rs.org.br

(51) 999330700

www.abes-rs.org.br



encerrado em abril de 2018. O projeto foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do edital de chamadas públicas MCT/FINEP/ação transversal saneamento ambiental e habitação 06/2010.

A estação de tratamento de esgotos (ETE) experimental opera tratando aproximadamente 1500 L.d⁻¹ através de um tanque séptico com volume de 4,7 m³, seguido de um WCFV-FS com uma área superficial de 24,5 m². O sistema foi vegetado com a planta ornamental *Canna x generalis*, escolhida por sua boa adaptação ao clima, pelo embelezamento paisagístico proporcionado por suas flores e por ser uma das melhores espécies para uso em climas tropicais (LOMBARD-LATUNE e MOLLE, 2017).

O WCFV-FS possui como material filtrante uma camada de fundo de 20 cm de brita n. 2, uma camada intermediária de 50 cm de brita n. 1 e uma camada superficial de 5 cm de brita n. 2, totalizando 75 cm de profundidade.

A alimentação do WCFV-FS é realizada por meio de três linhas de distribuição, localizadas a 50 cm acima do material filtrante. Cada linha é constituída por um tubo de PVC de 32 mm de diâmetro, com furos de 6 mm de diâmetro espaçados a cada 20 cm nos primeiros 3 metros de tubo e a cada 10 cm nos 3 metros restantes. Essas tubulações permitem a distribuição uniforme do efluente, que percola verticalmente através da camada filtrante até atingir o sistema de drenagem.

A drenagem do efluente é composta por três linhas de esgotamento localizadas no fundo do WCFV-FS, assentadas sobre uma camada de brita n.º 2. As linhas são formadas por tubos de PVC de 40 mm de diâmetro, com furos de 8 mm espaçados a cada 10 cm. Cada linha de drenagem está conectada a um tubo de ventilação para aumentar a transferência de oxigênio.

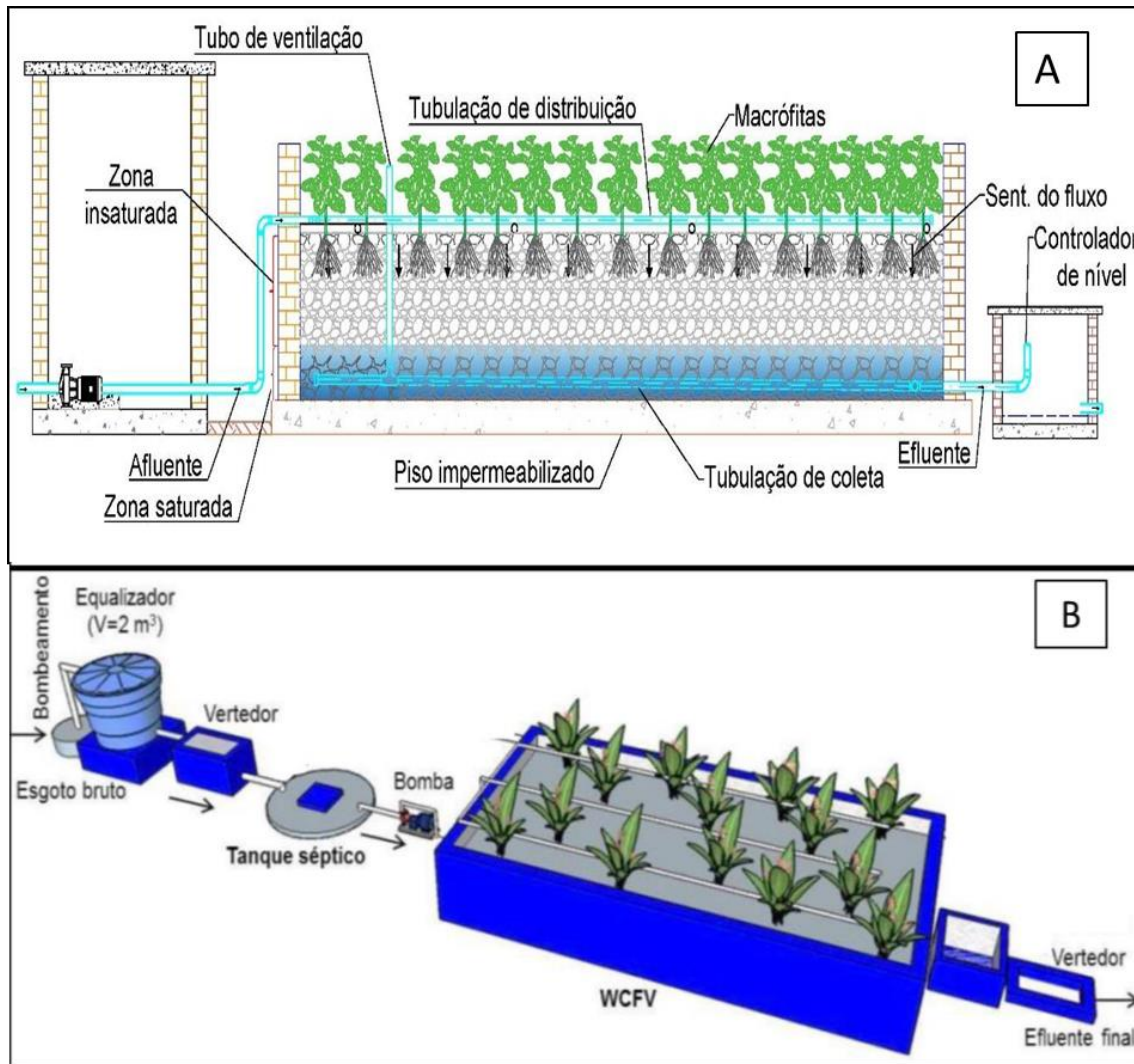
A carga orgânica aplicada foi definida com base no estudo de Decezaro et al. (2019), onde as melhores eficiências de remoção de DQO para o sistema foram obtidas com carregamentos entre 19 e 47 g DQO m⁻²d⁻¹. A taxa de aplicação hidráulica utilizada foi de 60 mm d⁻¹ (Q = 1500 L d⁻¹), também definida nesse estudo.

A unidade experimental, que já estava em funcionamento antes desta pesquisa, foi modificado para incluir uma camada saturada de 25 cm no fundo do wetland, criando uma zona anaeróbia/anóxica que melhora o tratamento de materiais em suspensão (sedimentação), da matéria carbonácea (consumo de carbono pela desnitrificação) e nitrogênio. O sistema foi alimentado diariamente, sem interrupções. A tubulação de saída do efluente tratado foi alterada para manter a saturação no WCFV. A Figura 1A ilustra esquematicamente um WCFV-FS. O sistema experimental (Figura 1B) foi implantado para tratar uma parcela dos efluentes domésticos gerados na CEU II (vazão = 1500 L d⁻¹), equivalente a 10 habitantes.

A coleta de efluentes para análise foi realizada em três pontos, EB – Esgoto Bruto; TS - Efluente do tanque séptico (na linha de recalque); WC - Efluente do WCFV-FS. As análises laboratoriais foram realizadas para avaliar a eficiência de tratamento do sistema, focando na DBO como parâmetro de monitoramento. As amostragens dos efluentes foram simples, pois as concentrações de saída não apresentaram variabilidade significativa.

Figura 1 - (A) Corte esquemático de um WCFV-FS. (B) Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgotos Experimental, na UFSM.





Fonte: Modificado de Decezaro et al. (2019)

As análises físico-químicas do esgoto foram realizadas no Laboratório de Engenharia e Meio Ambiente (LEMA), no Centro de Tecnologia, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com base no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

A remoção de poluentes foi avaliada considerando o efluente tratado no TS e o efluente tratado no WCFV-FS, sendo calculada a eficiência utilizando a equação 1 (VON SPERLING, 2014).

$$E = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} * 100 \quad (1)$$

Em que:

E = eficiência de remoção (%);

C₀ = concentração afluente do poluente (massa/volume; mg/L);

C_e = concentração efluente do poluente (massa/volume; mg/L).

Os dados obtidos a partir das análises de DBO do WCFV-FS foram submetidos a estatística descritiva (média, mediana, variância e desvio padrão dos dados). Para comparação entre os pontos de coleta, com relação ao desempenho do tratamento, foi utilizado ANOVA, com 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 constam os resultados das análises de DBO nos três pontos de coleta, com média, mediana e desvio padrão.

Tabela 1 - Média, mediana e desvio padrão de análises de DBO, em três pontos de coleta, EB, TS e WC.

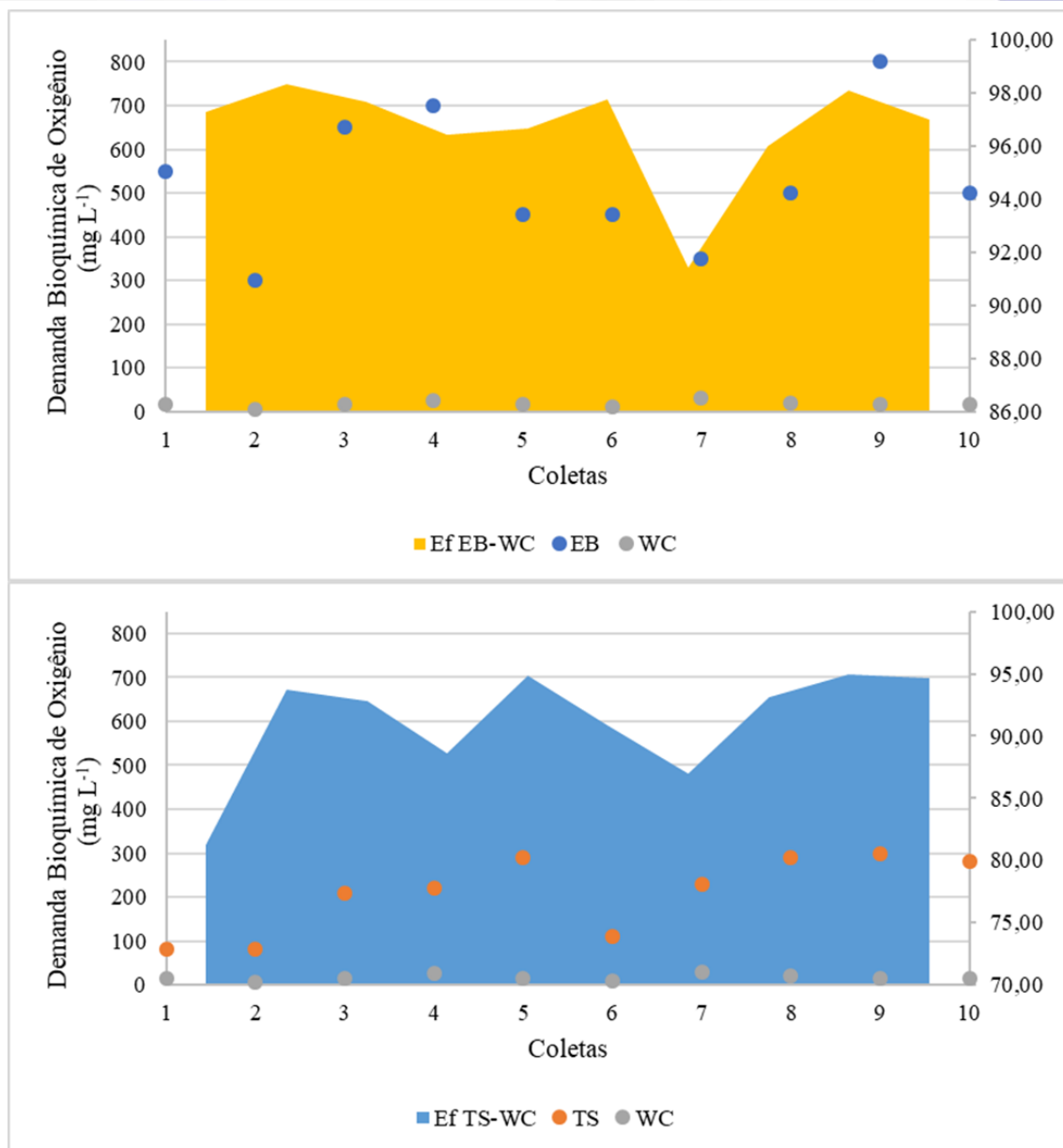
Amostra	EB (mg L ⁻¹)	TS (mg L ⁻¹)	WC (mg L ⁻¹)
1	550	80	15
2	300	80	5
3	650	210	15
4	700	220	25
5	450	290	15
6	450	110	10
7	350	230	30
8	500	290	20
9	800	300	15
10	500	280	15
Média	525	209	16,5
Mediana	500	225	15
DP	155,01	88,25	7,09
CV	30%	42%	43%

Os dados da Tabela 1 mostram diferenças significativas nas suas medidas estatísticas em EB-WC com p-valor de 0,0000 e, em TS-WC, com p-valor também de 0,0000. A média de DBO para EB, TS e WC foram, respectivamente, 525, 209 e 16,5 mg L⁻¹. A média de 525 mg L⁻¹ para o EB indica que os dados estão centralizados em torno de um valor elevado, enquanto a média de 209 mg L⁻¹ para TS e 16,5 mg L⁻¹ para o WC mostram valores médios consideravelmente menores. A mediana para EB foi de 500, um pouco abaixo da média, sugerindo uma leve assimetria nos dados. Para o TS, a mediana de 225, superior à média, indica uma possível distribuição assimétrica com predominância de valores menores. Para o WC, a mediana de 15, próxima da média, sugere uma distribuição simétrica. O desvio padrão (DP) de 155,01 para o EB indica alta variabilidade, enquanto o DP de 88,25 para o TS e 7,09 para o WC mostram variações menores, especialmente para o WC, que tem uma baixa dispersão ao redor da média. Em resumo, o EB apresenta alta variabilidade e dispersão enquanto que o TS mostra uma variabilidade moderada com distribuição assimétrica, e o WC exibe uma distribuição mais simétrica e consistente, com baixa variabilidade. Além disso, o coeficiente de variação (CV) confirma a variabilidade relativa dos dados, com 30% para o EB, 42% para o TS e 43% para o WC, sugerindo que, apesar da eficiência do tratamento, a variabilidade relativa dos níveis de poluição no final do processo ainda é alta. Estes resultados destacam a necessidade de monitoramento contínuo e ajustes nos processos de tratamento para manter a eficiência e reduzir a variabilidade dos níveis de poluição.

Portanto, os valores estatísticos fornecem informações importantes para otimizar a operação e a manutenção dos diferentes componentes do sistema de tratamento de águas residuais, destacando a importância de um monitoramento contínuo e detalhado.

Figura 2 – Eficiência da remoção de DBO, entre EB-WC e TS-WC





Nota-se que ocorreu uma alta eficiência de remoção entre o EB-WC, com média de 96,67%. Já a média de remoção entre o TS-WC foi de 91,19%. Bassani et al. (2021) encontraram uma remoção de matéria orgânica relativa à DBO de 90,6%, em WCFV plantado com *Typha domingensis* e leito de areia, parcialmente saturado. Hernández-Castelán et al. (2024) realizaram um estudo, usando *Typha latifolia* e *Heliconia psittacorum* para tratar águas de rios contaminadas com lixiviado de lixões a céu aberto e águas residuais domésticas em WCFV parcialmente saturado, chegando a eficiências de 83% de remoção de DBO. Kpannie et al. (2021) usando xisto da Costa do Marfim como substrato em um WC parcialmente saturado, alcançaram uma eficiência média de 89,4% na remoção de matéria orgânica por DBO.

Estes resultados são consistentes e demonstram que os WCFV-FS constituem um método eficaz para a remoção de matéria orgânica de águas residuais. A eficácia pode variar dependendo das plantas utilizadas, do substrato e das condições operacionais específicas do sistema. As elevadas eficiências de remoção observadas nos estudos citados sugerem que os WCFV-FS são uma opção viável e sustentável para o tratamento de águas residuais, proporcionando uma alternativa ambientalmente adequada aos métodos convencionais de tratamento.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a eficácia dos *wetlands* construídos de fluxo vertical com fundo saturado (WCFV-FS) na remoção de matéria orgânica, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Os resultados demonstraram uma alta eficiência de remoção entre os diferentes estágios do sistema. A média de remoção de DBO entre esgoto bruto e o WCFV-FS foi de 96,67%, enquanto que entre o tanque séptico e o WCFV-FS foi de 91,19%.

Esses resultados confirmam a viabilidade dos WCFV-FS parcialmente saturados como uma alternativa sustentável e eficaz para o tratamento de águas residuais, especialmente em áreas com recursos limitados para tecnologias mais complexas de tratamento. A baixa variabilidade e alta consistência na remoção de matéria orgânica observadas neste estudo destacam a robustez do sistema, tornando-o adequado para aplicações diversas.

Pesquisas futuras devem explorar a influência de diferentes espécies vegetais e materiais de substrato na eficiência dos WCFV-FS, além de avaliar o desempenho do sistema em condições operacionais variáveis. A integração de WCFV-FS em sistemas de saneamento descentralizados pode proporcionar benefícios ambientais significativos, incluindo a melhoria da qualidade da água e a redução de impactos ecológicos.

Agradecimentos

À CAPES (Número do pós-doc estratégico: 88881.691616/202201) pelo pagamento da inscrição no evento e pela bolsa de doutorado de Carine Baggiotto; à FINEP pelo financiamento do projeto RENTED.

REFERÊNCIAS

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2017.

BASSANI, L.; PELISSARI, C.; REIS, A.; SEZERINO, P. H. Feeding mode influence on treatment performance of unsaturated and partially saturated vertical flow constructed wetland. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 141800-142400, 2021.

CHAPRA, S.C.; CAMACHO, L.A.; MCBRIDE, G.B. Impact of Global Warming on Dissolved Oxygen and BOD Assimilative Capacity of the World's Rivers: Modeling Analysis. **Water**. 2021, 13, 2408.

DAWEN, G.; NABI, M. New Constructed Wetlands. In **Novel Approaches Towards Wastewater Treatment: Effective Strategies and Techniques** (pp. 241-313). Cham: Springer Nature Switzerland. 2024.

DECEZARO, S. T.; WOLFF, D. B.; PELISSARI, C.; RAMÍREZ, R. J. M. G.; FORMENTINI, T. A.; GOERCK, J.; RODRIGUES, L. F.; SEZERINO, P. H. Influence of hydraulic loading rate and recirculation on oxygen transfer in a vertical flow constructed wetland. **Science of the Total Environment**. v. 668, p. 988–995. 2019.



DOTRO, G.; LANGERGRABER, G.; MOLLE, P.; NIVALA, J.; PUIGAGUT, J.; STEIN, O.; VON SPERLING, M. Biological wastewater treatment series: Treatment Wetlands. Londres: **IWA Publishing**, v. 7, 2021.

HERNÁNDEZ-CASTELÁN, D. A., ZURITA, F., MARÍN-PEÑA, O., BETANZO-TORRES, E. A., SANDOVAL-HERAZO, M., CASTELLANOS-RIVERA, J., SANDOVAL HERAZO, L. C. Effect of monocultures and polycultures of *Typha latifolia* and *Heliconia psittacorum* on the treatment of river waters contaminated with landfill leachate/domestic wastewater in partially saturated vertical constructed wetlands. **International Journal of Phytoremediation**, 1–12. 2024.

KPANNIEU, D.E.; MALLET, M.; ANDRÉ, E.; COULIBALY, L.; RUBY, C. Efficiency of saturated vertical-flow filters planted with *Panicum maximum* reeds for passive wastewater treatment. *Environmental Technology*, 44(5), 708–720. 2021.

LOMBARD-LATUNE, R., MOLLE, P. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. [reportType_6] **Agence française pour la Biodiversité**. 2017.

NGUYEN, M. K.; HUNG, N. T. Q.; NGUYEN, C. M.; LIN, C.; NGUYEN, T. A.; NGUYEN, H. L. Application of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) for organic matter removal from contaminated surface water. **Bioresource Technology Reports**, 22, 101431. 2023.

SANGAMNERE, R.; MISRA, T.; BHERWANI, H.; KAPLEY, A.; KUMAR, R. A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies. **Sustainable Water Resources Management**, 9(2), 58. 2023.

TANNER, C. C.; HEADLEY, T. R.; WELLS, S. A. Pathways of nutrient removal in constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 756, 143908. 2020.

VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61-75. 2011.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. v. 1., 4. ed., Belo Horizonte: UFMG, 2014. 452 p.

YADAV, A.; JADHAV, D.A.; GHANGREKAR, M.M.; MITRA, A. Effectiveness of constructed wetland integrated with microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and to facilitate power generation. **Environ Sci Pollut Res**. 29, 51117–51129. 2022.

