

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL –
MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

DEISON ANTONIO TAUFER FOCHI

**SEQUÊNCIA DE WETLANDS DE FLUXO VERTICAL SATURADO COM
UNIDADE DE FLUXO COMPARTIMENTADO DE SUPERFÍCIE LIVRE
ASSOCIADOS COM FILTRO CONCÊNTRICO DE ARGILA EXPANDIDA
E MATERIAL CERÂMICO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE
URBANO**

Santa Cruz do Sul

2024

DEISON ANTONIO TAUFER FOCHI

SEQUÊNCIA DE WETLANDS DE FLUXO VERTICAL SATURADO COM UNIDADE DE FLUXO COMPARTIMENTADO DE SUPERFÍCIE LIVRE ASSOCIADOS COM FILTRO CONCÊNTRICO DE ARGILA EXPANDIDA E MATERIAL CERÂMICO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para o título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Leandro Machado

Santa Cruz do Sul
2024

Dedico este trabalho a minha família, desde cedo, me ensinaram o valor do conhecimento para se entender o mundo e que me mostraram, pelo seu exemplo, que não há limites para a busca de um sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por dar forças, sabedoria, coragem e saúde a mim e a todos da minha família, pois sem Sua graça, não conseguiria as vitórias que me foram concedidas.

À minha amada, Leticia, por seu amor, paciência e por me auxiliar neste momento sem sua ajuda não conseguiria realizar este sonho;

Aos meus pais, Delandir e Jurema Fochi por sempre me apoiarem em todos os momentos nesta caminhada; e aos meus irmãos, Delandir e Juceline, pelo amor e carinho;

Ao meu orientador Dr. Ênio Leandro Machado, por esses anos de aprendizado e de amizade, orientação e ensinamentos que levarei por toda a vida;

À professora e amiga Dra. Adriane L. Rodriguez, por sempre incentivar a irmos adiante e pelo apoio à realização deste trabalho nos auxiliando com o laboratório para a execução das análises;

Ao colega e compadre Maurício, por toda a ajuda com as análises em laboratório, parceria e amizade. Um colega que nunca mediu esforços para me ajudar!

A todos os bolsistas do LATTAE que participaram dos experimentos ao longo dos anos, a vocês o meu muito obrigado!

A CAPES, pela bolsa concedida para a realização do mestrado;

A UNISC por proporcionar esses anos de conhecimento;

E por fim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho e que não foram citadas.

RESUMO

A falta de saneamento básico e problemas com tratamento de efluentes tanto domésticos como industriais, vem afetando diversos países do mundo. A busca por novas tecnologias, que sejam eficientes e viáveis tem aumentado ao longo dos anos. Uma alternativa promissora são os *Wetlands* Construídos (WCs). Os WCs são sistemas que com o auxílio de macrófitas reduzem e removem poluentes e contaminantes dos efluentes. No entanto, são poucas as pesquisas que abordam a integração de diferentes sistemas de *Wetlands* construídos e sistemas compartimentados com filtro cerâmico. Diante disso, o objetivo geral do presente estudo foi avaliar sistema de *Wetlands* de fluxo vertical com fundo saturado (WCFV/FS) com unidade de *Wetland* construído de fluxo compartimentado de superfície livre com filtro cerâmico (WCFC/FC) para o controle e remoção de nutrientes e contaminantes de efluente sanitário. Para atingir o objetivo, foi realizada análise bibliométrica visando compreender os avanços no tratamento de efluentes através dos *Wetlands* construídos integrados aos *Wetlands* construídos de superfície de água livre. Além disso, foi construído um WCFC/FC, integrado a um WCFV/FS para avaliar seu potencial de remoção de carga poluente do efluente urbano. Como resultados da pesquisa bibliométrica, foram obtidos um total de 84 artigos que tratam sobre os termos pesquisados ("free water surface" AND "sewage" AND "wetlands"). Sendo que as principais integrações encontradas entre os WCs foram entre o sistema de fluxo vertical + sistema de superfície de água livre, atingindo altas taxas de remoção de poluentes, sólidos suspensos, DBO₅, DQO e patógenos, evidenciando assim a eficiência dos sistemas integrados. Como resultados do estudo experimental, observa-se a eficiência do sistema principalmente para os parâmetros de STD, turbidez, COT e DQO. Além disso, foi encontrado o fungo *Arthobotrys thaumasia* (inverno) e o fungo pertencente ao gênero *Tullasnella* sp. (inverno/verão), fungos com grande importância para o desenvolvimento da macrófita no sistema. Portanto, a presente pesquisa traz resultados satisfatórios sobre a integração dos sistemas de *Wetlands* construídos com alternativa viável para o tratamento descentralizado de efluentes urbanos.

Palavras-chave: soluções baseadas na natureza; tratamento descentralizado; FWS; WCFV; fungos

ABSTRACT

SEQUENCE OF SATURATED VERTICAL FLOW WETLANDS WITH FREE SURFACE COMPARTMENTALIZED FLOW UNIT ASSOCIATED WITH EXPANDED CLAY AND CERAMIC MATERIAL CONCENTRIC FILTER FOR URBAN EFFLUENT TREATMENT

With rapid population growth, the generation of effluents has increased considerably, and the collection and treatment system still needs investment. For this reason, the search for new, efficient and viable technologies has been increasing over the years. One of the technologies that has shown promise is Constructed Wetlands (CWs). CWs are systems that use macrophytes to remove contaminants from effluents. However, there has been little research into the integration of different constructed wetland systems with compartmentalized ceramic filter systems. In view of this, the general objective of this study was to evaluate a saturated bottom vertical flow wetland system (SB/VFCW) with a free surface compartmentalized flow wetland unit with ceramic filter (FWSCCW/CF) in the control and removal of nutrients from sanitary effluent from a university campus. In order to achieve this objective, a bibliometric analysis was carried out using various studies, with the aim of understanding the advances in effluent treatment using constructed wetlands integrated with free-water surface constructed wetlands. In addition, a FWSCCW/CF was built, integrated with a SB/VFCW to evaluate its potential for removing contaminants from sanitary effluent. As a result of the bibliometric research, a total of 83 articles were obtained dealing with the search terms ("free water surface" AND "sewage" AND "wetlands"). The main integrations between WCs were between the vertical flow system + free water surface system, achieving high rates of removal of pollutants, suspended solids, BOD₅, COD and pathogens, thus demonstrating the efficiency of integrated systems. The results of the experimental study show that the system is efficient, especially in terms of TDS, turbidity, TOC and COD. In addition, the fungus species *Arthobotrys thaumasia* (winter) and *Tullasnella* sp. (winter/summer) were found, fungi that are very important for the development of the macrophyte in the system. This research therefore provides promising results on the integration of constructed wetlands systems for decentralized effluent treatment.

Keywords: nature-based solutions; decentralized treatment; FWS; CWVF; fungi

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (A) <i>Wetlands</i> construídos de fluxo vertical subsuperficial; (B) <i>Wetlands</i> construídos de fluxo horizontal subsuperficial; (C) Sistema <i>floating</i> e (D) Sistema de superfície de água livre. Fonte: Elaboração própria.....	10
Figura 2 - Esquema da estruturação dos artigos da dissertação.....	14

LISTA DE ABREVIATURAS

CO ₂	Dióxido de Carbono
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FMA	Fungos Arbusculares Micorrízicos
FWS	<i>Free Water Surface Systems</i>
NT	Nitrogênio Total
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
SbN	Soluções Baseadas na Natureza
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
WCs	Wetlands Construídos
WCFHS	Wetlands Construídos de Fluxo Horizontal Subsuperficial
WCFVS	Wetlands Construídos de Fluxo Vertical Subsuperficial
WCFV	Wetland Construído de Fluxo Vertical
WCFH	Wetland Construído de Fluxo Horizontal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVOS.....	8
	Objetivo Geral	8
	Objetivos específicos.....	9
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
	3.1 Wetlands Construídos.....	9
	3.2 Integrações de sistemas Wetlands construídos.....	11
	3.3 A importância dos meios filtrantes em sistemas de Wetlands construídos	12
	3.4 O papel das comunidades microbiana e fúngicas em Wetlands construídos	13
4	METODOLOGIA.....	13
5.	REFERÊNCIAS	15

1 INTRODUÇÃO

Atualmente poderia se dizer que há uma preocupação no acompanhamento da agenda do desenvolvimento sustentável (ODS – Agenda 2030) em relação aos seus 17 itens, incluindo o de número 6, que é *Água limpa e saneamento*, principalmente no tratamento de esgotos domésticos para sistemas descentralizados e para as cidades de médio e grande porte. Em todo o mundo, cerca de 4,2 bilhões de pessoas não possuem acesso ao saneamento básico. Não somente em comunidades de baixa renda ou desabrigados, mas em residências de classe média ou alta, onde não há serviços de coleta e tratamento de esgotos efetivamente controlados, mas sim os sistemas do tipo fossa/filtro e sumidouro ou rede de coleta pluvial (Avelar et al., 2023; Castro et al., 2023). De acordo com Organização das Nações Unidas (ONU), uma das soluções para esse problema é a tomada de decisões políticas concretas, buscando por soluções eficazes e eficientes para esse grave problema. Observa-se que muitos países vêm sofrendo com problemas de saneamento básico e tratamento de seus efluentes, tanto domésticos quanto industriais, tendo na maioria das nações em desenvolvimento, indicativos que o ODS 6 com o trio *Água-Saneamento-Higiene*, com poucos avanços (Bain et al., 2018; Nhamo et al., 2019). Esses problemas afetam diretamente a área da saúde e tem como consequência impactos negativos nas áreas sociais e ambientais (Rodrigues, 2021).

No Brasil, conforme os dados coletados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2022, cerca de 56% da população tem acesso à coleta de esgoto. Entretanto, aproximadamente 93 milhões não têm acesso a este serviço. Em 2022, apenas 52,2% dos esgotos do país foram tratados. A região Norte apresentou os dados mais perturbantes com apenas 19,8% dos esgotos tratados. A região Nordeste com 34,3%, a região Sudeste com 61,6%, a região Centro-Oeste com 59,3% e a região Sul com 48% dos esgotos tratados (Brasil, 2022).

Neste cenário preocupante, a busca por novas tecnologias com sistemas de baixo custo e menores impactos ambientais, com potencial para o saneamento descentralizado e de maior facilidade para manutenção, vem crescendo nos últimos anos, e as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) vem ganhando grande enfoque (Leah et al., 2021). Surgidas no final da primeira década dos anos 2000, o conceito de SbN vem ganhando destaque entre organismos internacionais e na União Europeia como uma aposta para adaptação às mudanças climáticas. As SbN são entendidas como soluções que de alguma forma se

inspiraram, copiaram ou basearam-se em processos naturais para gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos para a sociedade. Ainda existem diferentes definições e abordagens das SbN, mas em sua grande maioria se referem ao uso da natureza como uma estratégia econômica para o desenvolvimento humano (Nesshover et al., 2017).

Os *Wetlands* Construídos (WCs) são uma tecnologia sustentável e viável no controle e remoção de contaminantes e nutrientes das águas residuárias. Os WCs são eficientes para o tratamento de efluentes urbanos e industriais. São sistemas de tratamento projetados para auxiliar e até melhorar os processos físicos, químicos e biológicos para o tratamento de efluentes (Vymazal, 2010). Os WCs são considerados opções ecológicas para o tratamento de efluentes, com baixos custos de operação e manutenção. Além disso, eles possuem a capacidade de tratar diferentes tipos de efluentes (Dotro et al., 2017; Oliveira et al., 2021). A combinação dos WCs com os meios filtrantes, como materiais cerâmicos, desempenha um importante e eficiente mecanismo de remoção de poluentes (Yang et al., 2018). Diante disso, os WCs vem sendo considerados e utilizados em muitos projetos de SbN, sendo uma alternativa para o tratamento de efluentes sustentável e integrada com a ODS (Germann et al., 2023).

O desenvolvimento de ações para progredir nas metas do item 6 da ODS estão inseridas neste trabalho, tendo pesquisas com soluções inovadoras, sustentáveis e baseadas na natureza, para ampliar o aprimoramento de aplicações dos *Wetlands* construídos através de sistemas compactos, agregando alternativas que possibilitem a gestão e o gerenciamento sustentável do uso das águas.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar um sistema de *Wetlands* de fluxo vertical saturado com unidade de fluxo compartimentado de superfície livre associados com filtro concêntrico de argila expandida e material cerâmico no controle e remoção de contaminantes e nutrientes de efluentes sanitários.

Objetivos específicos

- I. Compreender os avanços no tratamento de efluentes através dos *Wetlands* construídos integrados aos *Wetlands* construídos de superfície de água livre, revisando estudos por meio de uma análise bibliométrica;
- II. Avaliar a eficiência da integração de sistemas mistos de *Wetlands* construídos no controle de contaminantes e recuperação de nutrientes presentes em efluentes sanitários de uma universidade com uso de material cerâmico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Wetlands Construídos

Os *Wetlands* Construídos são uma tecnologia sustentável utilizada como tratamento terciário alternativo no tratamento de águas residuárias. Os WCs possuem custos mais baixos, devido à baixa utilização de equipamentos mecânicos, físicos e químicos. Os mecanismos de tratamento, tanto físicos como químicos e biológicos, irão variar entre os WCs, pois cada sistema possui características e objetivos específicos para o tratamento de efluentes. Assim, os WCs além de serem eficientes na remoção de nutrientes e possuírem boas relações com o meio ambiente, quando comparado a outros tratamentos terciários, tornam-se sistemas importantes para o tratamento de águas residuárias domésticas e industriais (Verlicchi & Zambello, 2014; Waly et al., 2022).

Os WCs são classificados conforme o sentido de escoamento do efluente dentro do sistema. Sendo que os principais tipos de sistemas são: (A) *Wetlands* construídos de fluxo vertical subsuperficial; (B) *Wetlands* construídos de fluxo horizontal subsuperficial; (C) Sistema *floating* e (D) Sistema de superfície de água livre (Figura 1).

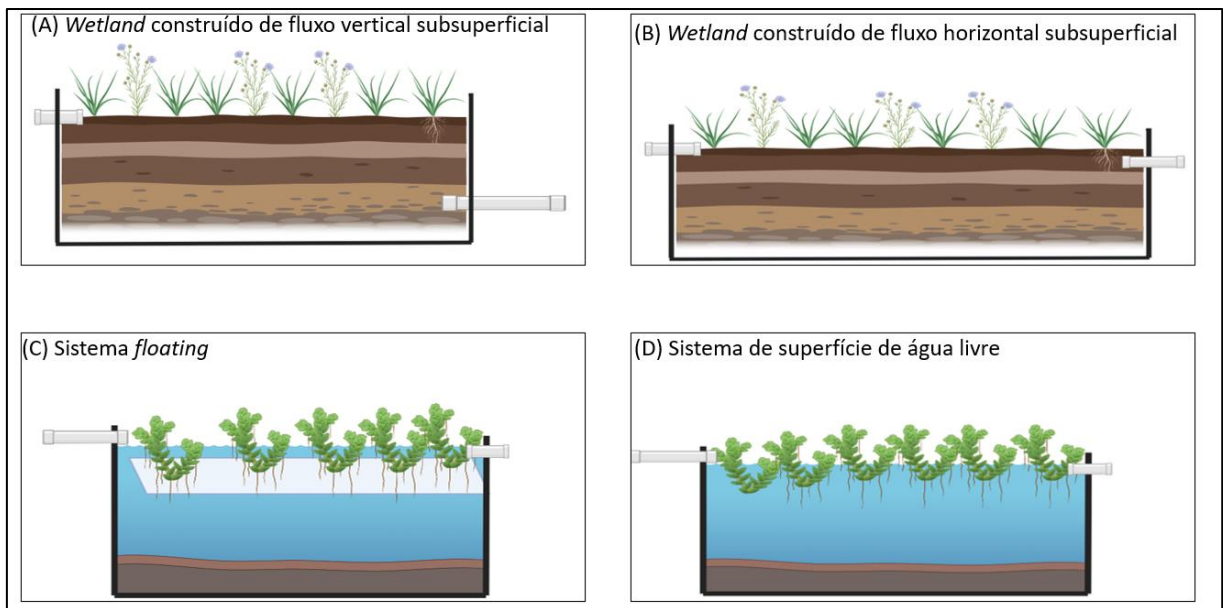


Figura 1. (A) *Wetlands* construídos de fluxo vertical subsuperficial; (B) *Wetlands* construídos de fluxo horizontal subsuperficial; (C) Sistema *floating* e (D) Sistema de superfície de água livre. Fonte: Elaboração própria.

Os *Wetlands* construídos de fluxo horizontal subsuperficial (WCFHS) o efluente move-se pela horizontal através da gravidade (declividade de 1-2%), o fluxo depende do espaço disponível e a profundidade varia de 30 – 60 cm, sendo que 40 cm é o aconselhável para o fluxo natural (Kaur et al., 2020).

Já nos *Wetlands* construídos de fluxo vertical subsuperficial (WCFVS) o efluente desloca-se verticalmente da camada plantada para baixo, através do substrato. Esse sistema é mais eficiente porque precisa de um menor tempo, quando comparado ao de fluxo horizontal. Com relação a profundidade desse sistema pode variar de 45 – 100 cm, sendo que 70 cm é o mais recomendado, onde irá proporcionar melhores resultados de nitrificação e na remoção de poluentes orgânicos (Kaur et al., 2020).

O Sistema *floating* são plataformas flutuantes que permitem o crescimento das macrófitas, onde as raízes delas espalham-se pelo WC formando um denso sistema de raízes. As macrófitas auxiliam na remoção dos micropoluentes (contaminantes emergentes) através da absorção e através de seu denso sistema de raízes que servem de superfície para a camada microbiana se desenvolver, formando um biofilme que é o responsável pela degradação dos micropoluentes (Sample et al., 2013; Kaur et al., 2020; Colares et al., 2020).

Os sistemas de superfície de água livre (FWS), são WCs que possuem o fluxo de água superficial. Esses sistemas são compostos de macrófitas flutuantes, submersas e emergentes (Kadlec & Wallace, 2009). São sistemas que tem ganhado destaque devido aos resultados promissores e viabilidade econômica e sustentável (Vymazal, 2013). Estudos recentes demonstram que os sistemas de superfície de água livre são eficientes principalmente na remoção de sólidos suspensos e materiais orgânicos. Entretanto a remoção de nutrientes pode variar devido a diversos fatores, como, a temperatura da água, a estação do ano, as concentrações de oxigênio dissolvido (OD) e a disponibilidade de carbono orgânico, podem influenciar na remoção de nitrogênio total (NT) (Vymazal, 2011). Já a remoção de fósforo (P), pode ser atingida, mas é lenta e depende da adsorção e precipitação do efluente (Vymazal, 2007; Krzeminska et al., 2023).

Sistemas de *Wetlands* construídos de um único estágio não são recomendados para tratamento de efluentes, sem um pré-tratamento. Uma vez que, alguns pesquisadores têm observado que esse tipo de sistema de estágio único apresenta baixa eficiência de remoção de poluente (Sayadi et al., 2012; Kiflay et al., 2021). Por isso, a busca pela integração dos sistemas é muito importante, mas são escassos os estudos.

3.2 Integrações de sistemas Wetlands construídos

Os *Wetlands* construídos são tecnologias eficazes e eficientes para o tratamento de efluentes, tanto domésticos como industriais. A integração entre os diferentes tipos de sistemas leva a melhorias no desempenho do tratamento dos efluentes.

Integrações entre os sistemas de *Wetlands* Construídos de Fluxo Vertical (WCFV) + Horizontal (WCFH), são as mais comuns e com bons resultados para os processos de nitrificação/desnitrificação (Vymazal, 2007, Ávila et al., 2013). Além desse processo, estudos demonstram a eficiência da integração desses sistemas para a remoção de amônia em efluentes industriais e domésticos (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2011; Vymazal & Kröpfelová, 2015).

Sistemas integrados como os WCFV + FWS apresentaram resultados interessantes na remoção de poluentes como SST, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, além de patógenos que podem ser removidos pelo WCFV (Stefanakis et al., 2014) e FWS (Kadlec & Wallace, 2009). No WCFV, a matéria orgânica é decomposta por processos aeróbicos e anaeróbicos, sendo que o processo aeróbico é mais abundante devido o oxigênio presente na coluna da água. Assim, aumenta a eficiência de remoção de DBO₅ e DQO

(Stefanakis et al., 2014; Vymazal, 2007) e nitrificação da amônia (Vymazal, 2005; Nguyen et al., 2020a). Por outro lado, o sistema FWS, melhora a qualidade do efluente para o lançamento, principalmente no processo de desnitrificação (Ghermandi et al., 2007; Saeed & Sun, 2012) e na remoção de fósforo, atingindo eficiências entre 73% e 85% (Machado et al., 2017; Colares et al., 2020; Dell'Osbel et al., 2020).

3.3 A importância dos meios filtrantes em sistemas de Wetlands construídos

Nos *Wetlands* construídos a escolha correta do meio filtrante é fundamental, uma vez que os meios filtrantes apropriados unidos as macrófitas atuam na remoção de contaminantes das águas residuárias através de processos de filtração física, reações químicas e biológicas (Polińska et al., 2021, Rodrigues, 2021). Além disso, o meio filtrante a ser utilizado nos sistemas deve levar em conta o custo, a eficiência de remoção de contaminantes e como servirá de suporte para as macrófitas. Os meios filtrantes alternativos, como de pedrisco e areia em sistemas WCs podem oferecer importantes benefícios, principalmente na remoção de poluentes específicos e redução de custos (Rodrigues, 2021; Yang et al., 2022).

O desempenho dos WCs, pode estar ligado aos meios de suporte e substratos utilizados. Uma vez que o tipo de suporte/substrato, a combinação e a modificação deles podem influenciar o biofilme que ali irá se formar. Materiais como britas, areia, zeólitas, vermiculitas, biocerâmicas dentre outros materiais podem ser utilizados, no entanto, podem apresentar alguma limitação, devido as suas capacidades de adsorção de contaminantes (Fang, et al., 2018).

Um meio filtrante que vem sendo utilizado e tem apresentado resultados satisfatórios é o biocarvão, também conhecido como biochar (Feng et al., 2023). Os dispositivos de adsorção utilizados pelo biocarvão para a remoção da matéria orgânica, variam devido as propriedades do poluente e a superfície química do biocarvão (Rosales et al., 2017). Assim, os poluentes orgânicos podem ser adsorvidos na superfície do biocarvão através de grupos funcionais hidrofóbicos (Reguyal et al., 2017).

Uma das vantagens da utilização do biochar como meio filtrante são os seus benefícios ambientais e agrícolas. Uma vez que utilizado no solo, o mesmo auxilia no aumento da disponibilidade de nutrientes, melhorias na atividade microbológica, aumento da matéria orgânica no solo, retenção da umidade e diminui a emissão de gases de efeito estufa (Woolf et al., 2010; Rodrigues, 2021).

3.4 O papel das comunidades microbiana e fúngicas em Wetlands construídos

A comunidade microbiana presente nos WCs é muito importante para a remoção dos micropoluentes encontrados nos efluentes. Processos biológicos como a oxidação da amônia, a desnitrificação e a fixação do nitrogênio ocorrem dentro dos WCs devido às diferentes bactérias encontradas (Fernandes et al., 2015). As bactérias fornecem uma proteção para as macrófitas contra os agentes patogênicos e contaminantes, além de melhorar a nutrição e o crescimento delas (Mastretta et al., 2009).

Em águas residuárias as plantas e bactérias interagem simbioticamente. É nessa simbiose, que as plantas, por meio da fotossíntese, fornecem a maior parte do oxigênio utilizado pelas bactérias aeróbias na degradação da matéria orgânica. Com isso, as bactérias, por sua vez, liberam pela respiração o CO₂, que juntamente com outros produtos auxiliam no desenvolvimento vegetal. A presença de micorrizas é outra simbiose que maximiza a eficiência do tratamento de águas residuárias. As micorrizas auxiliam no aumento da absorção de água e elementos orgânicos pelas plantas (Matta et al., 2007).

Os fungos exercem um importante papel nos sistemas de Wetlands construídos. De acordo com Hu et al. (2021) os Fungos Arbusculares Micorrízicos (FMA) aumentam a resistência das macrófitas contra os estresses bióticos e abióticos, como a presença de metais pesados, períodos de seca e a presença de contaminantes orgânicos. Além do mais, os FMA contribuem com o crescimento das macrófitas como a *Glyceria máxima* e auxiliam na remoção de fármacos (ibuprofeno e diclofenaco) (Hu et al., 2021).

4 METODOLOGIA

A dissertação é composta, além desta parte introdutória e o referencial teórico e dois artigos científicos (Figura 2).

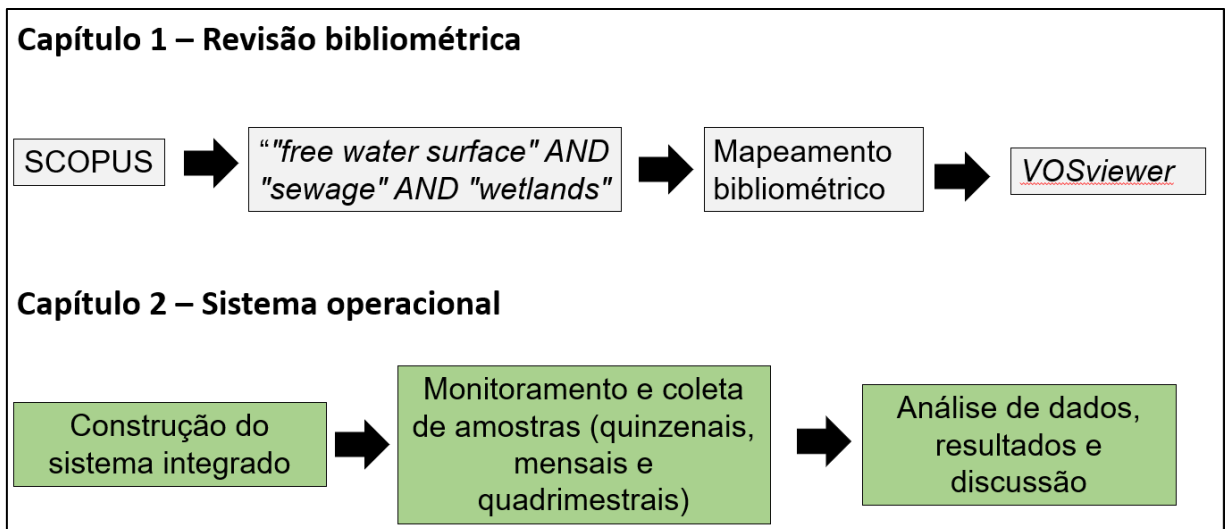


Figura 2. Esquema da estruturação dos artigos da dissertação.

O primeiro artigo corresponde ao primeiro objetivo específico da dissertação. Para a composição deste artigo foi realizada uma extensa revisão bibliográfica com auxílio da base de dados SCOPUS sobre os *Wetlands* construídos, *Wetlands* construídos de superfície de água livre e esgoto. O trabalho, intitulado “*Free water surface constructed wetlands review: configurações aplicadas com sistemas integrados no tratamento descentralizado de efluentes*”, teve como objetivo compreender os avanços no tratamento de efluentes através dos *Wetlands* construídos de superfície de água livre, revisando estudos por meio de uma análise bibliométrica. Este artigo foi submetido a revista *Ecohydrology & Hydrobiology* e no momento está em revisão.

O artigo seguinte intitulado “Aprimoramento de sistemas integrados de *Wetlands* construídos para o tratamento de efluentes sanitários de uma universidade” aborda a parte experimental da dissertação e corresponde ao segundo objetivo específico do trabalho. O segundo artigo expõe os resultados da concepção e monitoramento da integração dos sistemas de *Wetlands* construídos em escala piloto para o tratamento de efluentes universitários e a investigação da comunidade fúngica presente na macrófita *Canna generalis*. Este trabalho será submetido na revista *Ecological Engineering*.

5. REFERÊNCIAS

Avelar Portillo, L. J., Kayser, G. L., Ko, C., Vasquez, A., Gonzalez, J., Avelar, D. J., ... & Chiang, Y. Y. (2023). Water, Sanitation, and Hygiene (WaSH) insecurity in unhoused communities of Los Angeles, California. *International Journal for Equity in Health*, 22(1), 1-19.

Ávila, C., Garfí, M., & García, J. (2013). Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions. *Ecological engineering*, 61, 43-49.

Bain, R., Johnston, R., Mitis, F., Chatterley, C., & Slaymaker, T. (2018). Establishing sustainable development goal baselines for household drinking water, sanitation and hygiene services. *Water*, 10(12), 1711.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2022. Brasília: SNS/MDR, 2023. 108 p.: il.

Castro, F. A. B., Salomão, A. L. D. S., & Netto, A. T. (2023). Sanitary conditions of the third largest informal settlement in Brazil. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 13(12), 962-973.

Colares, G. S., Dell'Osbel, N., Wiesel, P. G., Oliveira, G. A., Lemos, P. H. Z., da Silva, F. P., Machado, Ê. L. (2020). Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis [Review]. *Science of the Total Environment*, 714, Article 136776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776>

Dell'Osbel, N., Colares, G. S., Oliveira, G. A., Rodrigues, L. R., da Silva, F. P., Rodriguez, A. L., ... & Machado, Ê. L. (2020). Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: increased nutrient removal and landscape potential. *Ecological Engineering*, 158, 106072.

Fang, C., Zhang, X., Lei, Y., Yuan, Y., & Xiang, Y. (2018). Nitrogen removal via core-shell bio-ceramic/Zn-layer double hydroxides synthesized with different composites for domestic wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 181, 618-630.

Feng, L., Gao, Z., Hu, T., He, S., Liu, Y., Jiang, J., ... & Wei, L. (2023). Performance and mechanisms of biochar-based materials additive in constructed wetlands for enhancing wastewater treatment efficiency: A review. *Chemical Engineering Journal*, 144772.

Fernandes, J. P., Almeida, C. M. R., Pereira, A. C., Ribeiro, I. L., Reis, I., Carvalho, P., ... & Mucha, A. P. (2015). Microbial community dynamics associated with veterinary antibiotics removal in constructed wetlands microcosms. *Bioresource technology*, 182, 26-33.

Germann, V., Borgwardt, F., Fischer, J., Fuchs-Hanusch, D., Regelsberger, M., Schubert, G., ... & Langergraber, G. (2023). Development and Evaluation of Options for Action to Progress on the SDG 6 Targets in Austria. *Journal of environmental management*, 325, 116487.

Ghermandi, A., Bixio, D., & Thoeye, C. (2007). The role of free water surface constructed wetlands as polishing step in municipal wastewater reclamation and reuse. *Science of the Total Environment*, 380(1-3), 247-258.

Hu, S., Hu, B., Chen, Z., Vosátka, M., & Vymazal, J. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi modulate the chromium distribution and bioavailability in semi-aquatic habitats. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129925.

Kadlec R., & Wallace S. (2009) *Treatment wetlands*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Kaur, R., Talan, A., Tiwari, B., Pilli, S., Sellamuthu, B., & Tyagi, R. D. (2020). Constructed wetlands for the removal of organic micro-pollutants. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 87-140). Elsevier.

Kiflay, E., Selemanni, J., & Njau, K. (2021). Integrated constructed wetlands treating industrial wastewater from seed production. *Water Practice & Technology*, 16(2), 504-515.

Leah L. Bremer, Bonnie Keeler, Pua'ala Pascua, Rebecca Walker, Eleanor Sterling, Chapter 5- Nature-based solutions, sustainable development, and equity, Editor(s): Jan Cassin, John H. Matthews, Elena Lopez Gunn, *Nature-based Solutions and Water Security*, Elsevier, 2021, Pages 81-105, ISBN 9780128198711, <https://doi.org/10.1016/B978012-819871-1.00016-6>.

Machado, A. I., Beretta, M., Fragoso, R., & Duarte, E. D. C. N. F. D. A. (2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of environmental management*, 187, 560-570.

Mastretta, C., Taghavi, S., van der Lelie, D., Mengoni, A., Galardi, F., Gonnelli, C., ... & Vangronsveld, J. (2009). Endophytic bacteria from seeds of *Nicotiana tabacum* can reduce cadmium phytotoxicity. *International Journal of Phytoremediation*, 11(3), 251-267.

Matta, J. C., Andrade, S. R. D. L. T., & Mahler, C. F. (2007). *Fitorremediação: O uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental*. Oficina de Textos.

Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., ... & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the total environment*, 579, 1215-1227.

Nguyen, X. C., Tran, T. P., Hoang, V. H., Nguyen, T. P., Chang, S. W., Nguyen, D. D., ... & Bach, Q. V. (2020a). Combined biochar vertical flow and free-water surface constructed wetland system for dormitory sewage treatment and reuse. *Science of The Total Environment*, 713, 136404.

Nhamo, G., Nhemachena, C., & Nhamo, S. (2019). Is 2030 too soon for Africa to achieve the water and sanitation sustainable development goal?. *Science of the Total Environment*, 669, 129-139.

ONU – Organização das Nações Unidas (2020). Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico. Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/101526-mais-de-42-bilh%C3%B5es-de-pessoas-vivem-sem-acesso-saneamento-b%C3%A1sico#:~:text=Para%20a%20ONU%2C%20o%20acesso,c%C3%B3lera%20e%20a%20febre%20tifoide.>> acesso em 01 fev. 2024.

Polińska, W., Kotowska, U., Kiejza, D., & Karpińska, J. (2021). Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from water and wastewater; a review. *Water*, 13(15), 2065.

Reguyal, F., Sarmah, A. K., & Gao, W. (2017). Synthesis of magnetic biochar from pine sawdust via oxidative hydrolysis of FeCl₂ for the removal sulfamethoxazole from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 868-878.

Rodrigues, E. B. (2021). Utilização do biocarvão como meio filtrante de wetland construído vertical empregado no tratamento de esgoto sanitário.

Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448.

Sample, D. J., Wang, C. Y., & Fox, L. J. (2013). Innovative Best Management Fact Sheet. No. 1, Floating Treatment Wetlands.

Sayadi, M. H., Kargar, R., Doosti, M. R., & Salehi, H. (2012). Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment: A worldwide review. *Proceedings of the international academy of ecology and environmental sciences*, 2(4), 204.

Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment. Newnes.

Verlicchi, P., & Zambello, E. (2014). How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review. *Science of the Total Environment*, 470, 1281-1306.

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological engineering*, 25(5), 478-490.

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65.

Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549.

Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental science & technology*, 45(1), 61-69.

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2015). Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen. *Ecological Engineering*, 84, 202-208.

Waly, M. M., Ahmed, T., Abunada, Z., Mickovski, S. B., & Thomson, C. (2022). Constructed wetland for sustainable and low-cost wastewater treatment. *Land*, 11(9), 1388.

Wolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1(1), 56.

Yang, C., Zhang, X., Tang, Y., Jiang, Y., Xie, S., Zhang, Y., & Qin, Y. (2022). Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103140.

Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., & Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource technology*, 261, 441-452.