

Wetlands construídas para tratamento de efluentes industriais: revisão

Diante do aumento da população mundial, consumo em excesso e conseqüente poluição ambiental, a busca por alternativas eficientes que contribuam para a descontaminação das águas é de grande relevância. Os efluentes industriais apresentam composição física, química e biológica complexa, sendo que o tipo de matéria prima usada pela indústria definirá sua aparência, coloração, densidade, acidez e basicidade, temperatura e presença de compostos orgânicos e/ou inorgânicos. O descarte incorreto desse passivo ambiental pode causar danos à saúde e prejuízos ao ecossistema. Nesse contexto, a utilização da tecnologia de Wetlands Construídas (WC) para o tratamento de águas residuais industriais tem se tornado uma perspectiva crescente, visto suas inúmeras vantagens face aos tratamentos convencionais, como baixo custo, simplicidade na implantação e alta eficiência na remoção de poluentes emergentes. WC é um mecanismo, composto por lagoas ou canais artificiais rasos, que abrigam plantas aquáticas que possuem um leito filtrante, onde essas espécies vegetais promovem a atenuação de diversos contaminantes presentes no efluente. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica, preferencialmente no período de (2011/2021), sobre o uso de WC na fitorremediação de efluentes industriais, que ainda é uma alternativa pouco difundida no contexto nacional. Nesta revisão, diversas modalidades de WC que apresentam alto grau de eficiência para remoção de compostos poluentes dos efluentes industriais foram encontradas. Para além do mais, pode-se concluir que a aplicação dessa tecnologia representa a possibilidade de expandir o tratamento descentralizado de efluentes, alcançando diversas localidades de países em desenvolvimento, e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, gerados pelos tratamentos anaeróbios.

Palavras-chave: Wetlands construídos; Efluentes; Fitorremediação; Macrófitas.

Wetlands built for industrial effluent treatment: review

Due to the increase in world population, excessive consumption, and consequent environmental pollution, searching for efficient alternatives that contribute to water decontamination is very relevant. Industrial effluents present a complex physical, chemical, and biological composition, being that the type of raw material used by the industry may define its appearance, color, density, acidity and basicity, temperature, and the presence of organic and/or inorganic compounds. The incorrect disposal of this environmental liability can bring damage to health and harm to the ecosystem. In this context, the use of constructed wetlands (WC) technology for the treatment of industrial wastewater has become a growing scene. WC is a mechanism, composed of ponds or shallow artificial channels, which house aquatic plants that contain a filter bed, where these plant species promote the attenuation of various contaminants present in the effluent. Thus, the objective of this paper is to perform a literature review, particularly in the period of (2011/2021), about the use of WC in phytoremediation of industrial effluents, which is still a little diffused alternative in the national context. In this review, several modalities of WC that present a high degree of efficiency for removal of pollutant compounds from industrial effluents were found. Furthermore, it is possible to conclude that the application of this technology represents the opportunity to expand the decentralized wastewater treatment, reaching several locations in developing countries, and to reduce greenhouse gas emissions generated by anaerobic treatments.

Keywords: Constructed Wetlands; Wastewater; Phytoremediation; Macrophytes.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **11/04/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Approved: **30/04/2022**

Josiane Rodrigues Rocha da Silva 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7167715618230413>
<https://orcid.org/0000-0001-9611-590X>
josianerrr@hotmail.com

Gabriel Dorozo Bersanette 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1826586245570654>
<https://orcid.org/0000-0003-1940-5473>
dorozogabriel@gmail.com

Anna Carla Ribeiro 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4460909960005208>
<https://orcid.org/0000-0003-3202-0332>
annacarlaribeiro1@gmail.com

Hélio Conte 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7805899028515988>
<https://orcid.org/0000-0002-2090-0554>
hconte@uem.br

Luís Felipe Oliva dos Santos 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9101596566047791>
<https://orcid.org/0000-0001-8169-198X>
luisfelipe.oliva11@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0020

Referencing this:

SILVA, J. R. R.; RIBEIRO, A. C.; SANTOS, L. F. O.; BERSANETTE, G. D.; CONTE, H.. Wetlands construídas para tratamento de efluentes industriais: revisão. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.4, p.232-248, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0020>

INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento desenfreado da população mundial, e conseqüente aumento do consumo de bens e serviços, um enorme volume de compostos orgânicos e inorgânicos têm sido produzidos para aplicações no setor industrial. Estudos recentes alertam que este modelo econômico tem proporcionado uma contaminação ambiental sem precedentes, incluindo riscos à saúde humana e aos ecossistemas (SILVA et al., 2019).

Devido a este cenário ambiental complexo, a comunidade científica tem investigado diversas tecnologias para recuperação de áreas afetadas por diferentes compostos poluentes que tendem a apresentar longa permanência na natureza, como: metais pesados, pesticidas, fármacos, entre outros. Devido à multiplicidade dos fatores que caracterizam os compartimentos ambientais contaminados e os poluentes, não é possível estabelecer uma metodologia única que abarque todos os cenários e muitas vezes, o plano de remediação necessita englobar duas ou mais técnicas para garantir sua efetividade. A escolha do método de remediação envolve a avaliação de fatores como: eficiência e tempo do processo de descontaminação, simplicidade na execução, menor custo e se a técnica de remediação empregada não acarretará a produção de subprodutos ainda mais tóxicos do que a molécula inicial (SILVA et al., 2014; HASSAN et al., 2021).

Desta forma, a fitorremediação vem sendo amplamente discutida e empírica, pois consiste em um processo de seletividade natural e/ou resistência desenvolvida por espécies vegetais a determinados agentes xenobióticos (PIRES et al., 2003), podendo amenizar ou sanar os efeitos residuais de diversos contaminantes no solo ou na água, através da sua completa eliminação ou redução de sua toxicidade (KRUTZ et al., 2009).

A fitorremediação de solos contaminados, em particular, é fortemente relacionada com a composição do solo, a capacidade da planta em extrair os compostos poluentes do meio (fitoextração) e com a diversidade de microrganismos presentes no solo, os quais são capazes de favorecer o processo de remediação por meio de mecanismos de fitoestimulação que ocorrem através do aproveitamento de exsudatos radiculares (VASCONCELLOS et al., 2012).

Os solos contaminados podem ser remediados pelas plantas através das seguintes abordagens: fitoextração, fitoestabilização, rizofiltração, fitodegradação, fitoestimulação, fitovolatilização, cepas vegetativas, açudes artificiais e barreiras hidráulicas (BURKEN, 2002). Entretanto, a fitoextração é uma técnica que tem demonstrado ser bastante eficiente na remoção de metais pesados do solo pela parte aérea da planta que, após atingir seu estado de saturação, pode ser removida do local (ESTELA et al., 2018).

No caso do tratamento de águas residuárias contaminadas, a tecnologia chamada Wetlands Construídas (WCs) tem recebido imenso destaque e se apresentado como uma alternativa bastante completa e viável de fitorremediação, visto que seus mecanismos de atuação envolvem processos físicos (filtração e sedimentação), químicos (adsorção e precipitação) e biológicos (biodegradação e fitorremediação), cumprindo as necessidades atuais de tratamento prévio dos efluentes antes de seu lançamento nos corpos hídricos (HASSAN et al., 2021; KIFLAY et al., 2021).

Basicamente, as WCs são baseadas na construção de módulos de transição entre ecossistemas terrestres e aquáticos compostos por reservatórios que possuem meio filtrante apropriado somado a presença de plantas específicas para a remoção de contaminantes dos efluentes industriais que são injetados para dentro desse sistema (POLINSKA et al., 2021). O design desse tipo de projeto tem como foco a promoção das condições ideais que favorecem as reações naturais de autorregulação do ecossistema, permitindo a ciclagem de nutrientes dentro do sistema e a consequente degradação dos compostos poluentes em questão (WEI et al., 2020). O objetivo deste trabalho é, portanto, realizar um levantamento bibliográfico preferencialmente no período de (2011/2021), sobre o uso de Wetlands construídos na fitorremediação de efluentes industriais, com ênfase na sua difusão no contexto nacional.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa de revisão bibliográfica foi realizada em bases de dados online, sendo elas: Google Acadêmico, Science Direct, Scielo, periódicos da capes. Foram utilizados descritores em português (wetlands construído, efluentes industriais, fitorremediação) e inglês (built wetlands, industrial effluents, phytoremediation) preferencialmente entre os anos de 2011 e 2021.

Efluentes industriais

Existem diversas fontes de poluição difusas ou pontuais dos corpos hídricos, como águas residuais urbanas, escoamento superficial natural, águas residuais provenientes da agricultura e efluentes industriais. Entretanto, essa última categoria é responsável em grande parte por exercer pressão ambiental devido ao consumo de água em larga escala por processos industriais e consequente geração de enormes quantidades de efluentes contaminados (CRINI et al., 2018).

As águas residuais industriais podem ser classificadas em três vertentes: águas de lavagens de máquinas e tubulações; águas de sistemas de resfriamento e geradores de vapor e águas de manufaturas ou processos, as quais são utilizadas diretamente nos produtos ou em etapas do processo industrial. Além destas, também existem os esgotos sanitários oriundos das atividades dos funcionários. Exceto pelos volumes de águas utilizadas nos produtos e pelas perdas por evaporação, após sua utilização as águas tornam-se potencialmente contaminadas por compostos químicos ou pelas perdas de energia térmica, originando assim os efluentes líquidos (SILVA et al., 2013; CRINI et al., 2018).

A Norma Brasileira-NBR 9800/1987 define como efluente industrial todo e qualquer despejo líquido proveniente do processo industrial, compreendendo ainda emissões das águas de refrigeração poluídas, as águas pluviais poluídas e o esgotamento doméstico.

Em geral, os efluentes industriais apresentam composição físico-química e biológica complexa e variável de acordo com a matéria prima base usada pela indústria em questão. Por isso, a caracterização extensiva do efluente é essencial para a identificação e quantificação dos contaminantes que serão alvos de tratamento. De acordo com Rubinger (2009), os principais parâmetros a serem avaliados referentes às características físicas são: aparência, coloração, densidade, turbidez, condutividade elétrica e a temperatura.

Já os parâmetros químicos são investigados pelo conteúdo orgânico do efluente refletido por análises de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e carbono orgânico total (COT). Os parâmetros químicos inorgânicos, por sua vez, são monitorados por medições do pH, salinidade e a presença de compostos poluentes como: metais pesados, óleos, corantes, fármacos, detergentes, solventes clorados, hidrocarbonetos etc. As características biológicas contemplam análises sobre a presença e toxicidade de microrganismos patogênicos como bactérias, protozoários, fungos e vírus (CRINI et al., 2018; KHAN et al., 2018).

A alta diversificação do setor industrial nos tempos atuais implica também na existência de inúmeras tipologias de efluentes. Entretanto, pode-se destacar algumas delas como sendo umas das principais fontes de poluição atualmente: indústria têxtil, agroalimentar, celulose e papel e de tratamento de superfícies. O setor agroalimentar, que inclui indústrias lácteas, açucareiras e de processamento de vegetais apresentam efluentes com moléculas orgânicas que são facilmente degradadas. Indústrias têxteis e de celulose e papel, por sua vez, impactam os efluentes em relação ao uso extensivo de produtos químicos tóxicos. Vale ressaltar ainda as indústrias de mineração, curtumeira, metalúrgicas e petroquímicas que também contribuem extensivamente para a liberação de compostos tóxicos no meio ambiente. Segundo a Resolução nº 430 de maio/2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor se obedecerem às condições e padrões previstos na resolução. Para cumprir essas normas, a necessidade de tratamentos para esses efluentes, têm levado à realização de pesquisas para desenvolver novas tecnologias capazes de degradar ou imobilizar estes compostos, minimizando o volume e toxicidade dos mesmos (TAN et al., 2016).

Wetlands Construídas (WCS)

Wetlands construídas (WCs) ou terras úmidas são um mecanismo composto por lagoas ou canais artificiais rasos que possuem um leito filtrante e abrigam plantas aquáticas que promovem a atenuação de diversos tipos de contaminantes que possam estar contidos no efluente (DOTRO et al., 2017).

As WCs são tecnologias de tratamento ecologicamente corretas e sustentáveis que podem ser aplicadas para remediação de águas poluídas com diferentes características e apresentam vantagens quando comparadas às técnicas convencionais de tratamento, como: baixo custo de implantação e operação, simplicidade na operação e eficiência na remoção de poluentes, como os sólidos suspensos totais (SST), cargas orgânicas (DBO e DQO) e nutrientes solúveis (SEZERINO et al., 2018; KIFLAY et al., 2021). Ademais, é uma técnica robusta, pouco susceptível a variações de vazão e de concentrações do afluente (MATOS et al., 2015).

Os sistemas de WCs são concebidos de forma a replicar e otimizar os processos naturais de transformação da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes realizados de maneira sinérgica entre plantas e microrganismos, que ocorrem em ambientes alagados, como pântanos e mangues. As WC também podem ser aplicadas para outras finalidades, como: criação de habitats para animais selvagens ou espécies migratórias, controle de enchentes, retenção de sedimentos e restauração de rios urbanos poluídos

(VYMAZAL, 2013; STEFANAKIS et al., 2014; SEZERINO et al., 2018).

Existem diferentes configurações de Wetlands construídas para realizar o tratamento de efluentes industriais. A escolha do substrato para preenchimento do leito encontra-se na fase inicial do projeto e podem ser utilizados materiais usuais como brita e areia ou resíduos que podem ser valorizados como cascalho, escória ou bambu. Além disso, a classificação da configuração das WCs é baseada normalmente em função do sentido em que o efluente escoar no interior de cada unidade de tratamento (horizontal ou vertical), tipo de plantas utilizadas e sua disposição no sistema (flutuantes ou submersas) e o regime hidrológico do sistema (águas superficiais ou subsuperficial) (KHAN et al., 2018; SEZERINO et al., 2018). Para definição do tipo de WCs a ser utilizado deve-se avaliar a especificidade de cada sistema de tratamento de efluentes e ajustar o mais apropriado de acordo com as necessidades do projeto.

Os sistemas de WCs podem ser classificados em: wetlands construídas de fluxo superficial (WC-FS); wetlands construídas de fluxo subsuperficial (WC-FSS) e sistemas de WC híbridos, como pode ser observado na Figura 1. As wetlands construídas de fluxo subsuperficial ainda podem se subdividir em duas categorias: wetlands construídas de fluxo subsuperficial horizontal (WC-FSSH), onde o substrato encontra-se inundado por água, e wetlands construídas de fluxo subsuperficial vertical (WC-FSSV), onde os substratos são encharcados e drenados com uso intermitente de água no sistema (STEFANAKIS et al., 2014; WU et al., 2014; WANG et al., 2018), onde os sistemas são melhor descritos a seguir:

WC de fluxo superficial (WC-FS): o efluente possui fluxo acima da superfície, passando pelas folhas e caules, e as plantas apresentam-se enraizadas na camada de sedimento localizada na base. A incorporação de oxigênio é maior neste modelo em decorrência da exposição do efluente ao meio atmosférico. Ocorre também a exposição do efluente aos raios ultravioleta, gerando maior inativação de patógenos. Sua área aquática pode ser coberta com plantas de diferentes características como: submersas, flutuantes livres, flutuantes fixas ou macrófitas emergentes. De acordo com Stefanakis et al. (2014), a operação desse tipo de WC é similar aos wetlands naturais e contempla uma grande diversidade biológica: insetos, moluscos, aves e mamíferos, o que também amplia o potencial de exposição à patógenos por humanos ou a proliferação de vetores de doenças (International Water Association (IWA) Specialist Group 2000). Basicamente, esse sistema consiste em uma “piscina” rasa selada para evitar vazamento de águas residuais para o aquífero com substrato de solo de 40 cm de espessura para estabelecimento de macrófitas. Uma das desvantagens desse sistema é o fato de necessitarem de uma grande área de construção, os tornando desinteressantes para aplicação de reutilização dessa água.

WC de fluxo subsuperficial (WC-FSS): o fluxo do efluente é mantido abaixo do nível do leito, ficando em contato com o substrato, normalmente sendo este composto por um solo poroso de rochas e cascalho (HASSAN et al. 2021). A passagem do efluente pelo substrato ocasiona o contato com bactérias facultativas e com raízes das plantas macrófitas, onde ocorre a depuração da matéria orgânica através da formação de biofilme. A proliferação de agentes patógenos, e a exposição ao homem e animais são minimizados neste sistema.

WC de fluxo subsuperficial horizontal (WC-FSSH): o efluente percorre o leito em fluxo horizontal.

Nessa concepção, a entrada no efluente inicia-se no leito e segue dentro do sistema através de certa declividade. Nesse sistema o tratamento da água é dado devido a interconexão de processos biológicos, químicos e físicos à medida que as águas residuais passam através de zonas aeróbicas, anaeróbicas e anóxicas. A zona aeróbia termina quando o efluente está em contato com o sistema radicular das macrófitas. Como relatado por Tsihrintzis et al. (2007), o sistema WC-FSSH requer alto investimento para implementação mesmo requerendo uma área menor para construção, quando comparado ao sistema de WC-FS.

WC de fluxo subsuperficial vertical (WC-FSSV): O sistema de wetland com fluxo vertical foi desenvolvido inicialmente por um cientista alemão Seidel no início dos anos 1960, como reportado por Vymazal et al. (2011). Esse tipo de wetland se tornou famoso, devido ao posterior conhecimento sobre a deficiência dos WC-FSSH em termos de incapacidade de nitrificação da água residual devido a sua limitação da disponibilidade de oxigênio (COOPER, 1999; STEFANAKIS et al., 2014). Nesse sistema, a entrada do efluente ocorre na parte superior e a saída pela parte inferior do sistema. É construído em superfície plana e as macrófitas são plantadas na superfície superior do reator, assim seu sistema radicular infiltra nas camadas inferiores. Nos sistemas de WC-FSSV, a água a ser tratada é aplicada de modo intermitente em ciclos que inundam e drenam o substrato através da gravidade, elevando a taxa de oxigenação no sistema e melhorando a eficiência do tratamento biológico (ZHAO et al., 2004; VYMAZAL et al., 2008; LI et al., 2015). Esse tipo de wetland permite que altos volumes de água possam ser tratados por metro quadrado, sendo apropriado para a aplicação na agroindústria que necessita de grandes volumes de água para irrigação (VYMAZAL et al., 2006; FAN et al., 2012; SONG et al., 2015).

Prochaska et al. (2007) e Paing et al. (2015) indicaram que WC-FSSV são eficientes tanto na remoção de parâmetros como as demandas químicas e bioquímicas de oxigênio (DQO e DBO), assim como de partículas de águas residuárias (BRIX et al. 2005; SCHOLZ, 2011). Entretanto, esses sistemas são considerados ineficazes em termos de remoção de fósforo devido a sua interação insuficiente entre a água que vai ser tratada e o meio do sistema (LANGERGRABER et al., 2007; SONG et al., 2015). Embora os sistemas de wetlands construídos horizontais de subsuperfície são relatados como deficientes em termos de remoção de amônia-nitrogênio, devido às condições anóxicas e anaeróbias disponíveis, as quais, limitam essa nitrificação da amônia-nitrogênio, porém favorecem a desnitrificação do nitrato-nitrogênio (TUNÇSIPER, 2009; ZHANG et al., 2014). Em contraste devido a disponibilidade de condições aeróbicas em wetlands construídos de fluxo vertical de subsuperfície, amônia-nitrogênio são bem removidos através de processos de nitrificação, enquanto nitrato-nitrogênio não são bem removidos, pois a desnitrificação é ausente no sistema (ZHANG et al., 2014). Resumindo os sistemas de subsuperfície de fluxo horizontal são reconhecidos por grande potencial de desnitrificação, porém, baixa nitrificação, enquanto nos sistemas verticais mostra desempenho oposto (VYMAZAL et al., 2011; VYMAZAL, 2014). Isso fez com que os pesquisadores desenvolvessem um sistema de wetland combinado, que consiste, na união dos sistemas de subsuperfície vertical e horizontal, almejando obter uma maior porcentagem de remoção de nitrogênio (VYMAZAL, 2005; AYAZ et al., 2012; VYMAZAL, 2014).

Os sistemas de wetlands ainda podem ser híbridos, misturando modalidades, isto é feito a fim de se

otimizar a capacidade de remoção de poluentes ao se combinar as características das diferentes configurações (KHAN et al., 2018).

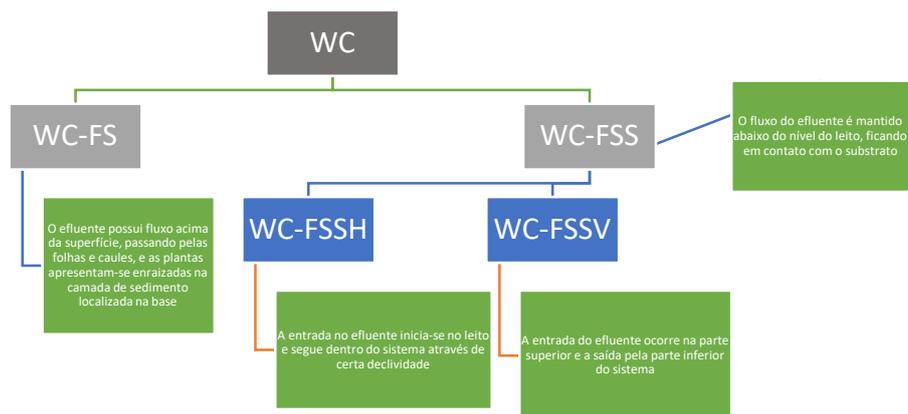


Figura 1: Configurações de projetos para Wetlands Construídas. **Fonte:** KHAN et al. (2018).

Dentre as diversas plantas com potencial de fitorremediação que podem ser usadas para o povoamento das WC, as macrófitas são as mais utilizadas por possuírem elevada capacidade de tolerância à toxicidade de diversos contaminantes e por sua capacidade de depuração dos mesmos (GUILTONNY et al., 2015). Além disso, essas espécies proporcionam boas condições para a formação de biofilme bacteriano em suas raízes e contribuem para o transporte de oxigênio e carbono para o sistema, favorecendo o desempenho da remoção de poluentes. O período de crescimento, adaptação e de senescência das espécies é um importante fator que deve ser rigorosamente monitorado no manejo da biomassa vegetal para garantir a eficiência do processo. As espécies de plantas nativas mais utilizadas para o povoamento das WCs no Brasil são da família Typhaceae e Poaceae, representadas pelas espécies *Typha* spp. e *Cynodon* spp., respectivamente. As espécies *Eleocharis* spp. e *Zizaniopsis* spp. também são contempladas nessa escolha, porém em menor porcentagem (SEZERINO et. al., 2015; MACHADO et al., 2016).

No geral, para além do benefício estético que esses sistemas proporcionam no meio onde estão instaladas, as WC desempenham diversas funções essenciais para o ecossistema semelhantemente às wetlands naturais, tal como: capacidade de recarga dos aquíferos, sequestro de dióxido de carbono pelas vegetação, mitigação dos gases de efeito estufa, absorção da energia solar, que é a base das cadeias alimentares e retenção/liberação de calor para a atmosfera (STEFANAKIS et al., 2014; MACHADO et al., 2016; VYMAZAL et al. 2021).

Contudo, apesar das muitas vantagens da implantação de WCs apresentadas na Figura 2, para Platzer et al. (2016) os problemas mais corriqueiros encontrados em projetos de WC são: demandam grandes áreas o que dificulta a sua implantação em grandes centros urbanos, necessidade de manejo constante das macrófitas, longo período para adaptação das plantas ao leito, e ainda, os sistemas de fluxo superficial estão suscetíveis à proliferação de vetores e incidência na produção de odores devido à lâmina d'água que se mantém exposta. Além disso, deve-se ter em conta que a inserção de espécies que não sejam nativas do local pode trazer um desequilíbrio para o ecossistema (GUILTONNY et al., 2015).

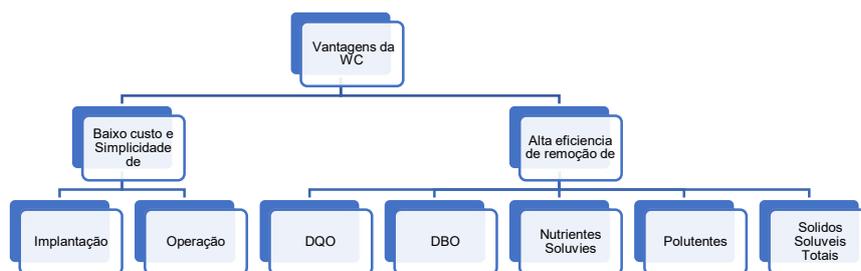


Figura 2: Vantagens da utilização das Wetlands Construídas. **Fonte:** SEZERINO et al. (2018).

Um dos critérios para projetar as WCs é a densidade populacional do local e o tamanho das WCs é delineado por m^2 /pessoa de acordo com cada tipo de configuração. No intuito de padronizar os projetos, o grupo de estudos brasileiros em sistemas Wetlands Brasil elaborou um documento de consenso sobre os principais parâmetros e critérios a serem utilizados no dimensionamento de WC de pequeno porte, em casos de efluentes domésticos, familiares e águas de cinzas. Vale ressaltar que o documento não tem a finalidade normativa do processo, mas sim de consolidar uma metodologia que muito contribuirá com avanços na eficiência de tratamento de 3 configurações de WC, nomeadamente: WC-FSSH, WC-FSV, que recebem efluentes pré-tratados, e de WC-FSV do modelo francês, que tratam o efluente bruto¹.

Desse modo, a idealização de projetos de WCs se faz extremamente necessária, uma vez que esse método abarca benefícios socioculturais, econômicos e ecológicos para todo o ambiente que a circunda (STEFANIKIS et al., 2014).

DISCUSSÃO

A aplicação biotecnológica de WC para o tratamento de efluentes tem sido utilizada com sucesso em países desenvolvidos da Europa e da América do Norte desde o século passado, como é o caso de um sistema WC em operação ininterrupta na Suíça por mais de 120 anos. No caso de países em desenvolvimento, as pesquisas nessa área começaram a despontar nas últimas décadas e foram atraídas principalmente pela necessidade de implementação de sistemas sanitários de baixo custo (MACHADO et al., 2016; SANTOS et al., 2019b).

Entretanto, em estudos de análises comparativas entre a utilização de WC em países de clima temperado e países de clima tropical e subtropical, Zhang et al. (2014) e Varma et al. (2021), reportaram que países com climas mais quentes apresentam grande potencial para implementação dessa tecnologia, visto que tais temperaturas e o fluxo de incidência solar tendem a favorecer os processos metabólicos das plantas/microrganismos e portanto, influenciam positivamente a biodegradação dos compostos poluentes. É importante também ter em consideração que, nesses climas, devem-se realizar monitoramentos constantes dos padrões de qualidade do sistema para evitar tanto a invasão de animais selvagens que podem danificar quanto a disseminação de vetores de doenças (MACHADO et al., 2016).

¹ <https://gesad.ufsc.br/files/2018/12/Boletim-Wetlands-Brasil-Edi%C3%A7%C3%A3o-Especial-Dimensionamento-de-Wetlands-Constru%C3%ADdo-no-Brasil-von-Sperling-Sezerino-2018-2.pdf>

Além disso, os sistemas de WC são bastante propícios para promover uma gestão descentralizada e eficaz do tratamento de efluentes em regiões com baixa densidade populacional, que geralmente estão localizadas em zonas rurais e possuem grande disponibilidade de terras (MACHADO et al., 2016; ALAM, 2019).

Os sistemas de wetlands construídos podem ser eficientes nos tratamentos de diversos efluentes, como ressalta Domingos et. al. (2011), mencionando efluentes têxteis, efluentes de laticínios, efluentes de suinocultura, desaguamento de tanques sépticos, lixiviados de aterro sanitário, efluentes industriais inorgânicos, efluentes de curtume, entre outros. Ainda em sua pesquisa, Domingos et al. (2011), estudou o desempenho de wetlands construídos de fluxo vertical, no tratamento de efluentes de uma indústria química e fertilizantes, na Austrália, com o objetivo de remover nitrogênio e metais pesados, observando bons resultados, como por exemplo 90% de retirada de amônia, contudo houve variação nos resultados por questões climáticas e períodos chuvosos. Estudos ainda mostram que em temperaturas mais baixas, boa parte dos microrganismos reduzem as taxas de reações bioquímicas, diminuindo os resultados do tratamento. (HIJOSA et al., 2011; VARMA et al., 2021), sendo importante levar em consideração tais variações.

Gholipour et al. (2020), no Irã, obteve ótimos resultados com WFHS, para o tratamento de efluentes da indústria de vidros, uma água residual rica em sólidos suspensos e altas concentrações orgânicas, e seus resultados foram acima de 90% de eficiência.

Com o uso indiscriminado de medicamentos, concentrações de diversos fármacos têm estado biodisponíveis, provocando danos ambientais. Diante disso, diversos estudos usando WC tem se mostrado eficiente, para remoção dos principais medicamentos utilizados no mundo. Ranieri et al. (2011), na Itália, estudaram a remoção de paracetamol em WC, testando diversos tipos de filtragem, alcançando até 99,9% de eficiência. Ávila et. al. (2014), na Espanha, avaliaram diferentes filtros, alimentação, aeração das WC para remoção de diclofenaco e paracetamol, atingindo 99% na remoção de paracetamol e 89% na remoção de diclofenaco. Chen et. al. (2016) investigaram efluentes na República Checa, para remoção de fármacos, principalmente paracetamol, e diclofenaco, usando WCFH, encontrando eficácia de 100% na extração de paracetamol e 95% na extração de diclofenaco.

Na revisão bibliográfica realizada por Tripathi (2021) e Vymazal (2021) os trabalhos relatam a importância do tratamento de efluentes farmacêuticos, através dos WC, Tripathi, complementa que principalmente agora neste momento de pandemia, onde a demanda por medicações aumentou consideravelmente, neste sentido o autor traz vários trabalhos que pode ser útil como um manual para selecionar o melhor modelo de wetlands construídos, substrato e plantas utilizadas, bem como componentes e práticas para remover o composto farmacêutico presente nas águas residuais.

Atualmente o uso dos sistemas de wetlands combinados (híbridos) são amplamente utilizados no mundo devido a sua eficiência em remover compostos nitrogenados de diversos tipos de águas residuais (VYMAZAL, 2005; VYMAZAL et al., 2011; AYAZ et al., 2012). Além de vários estudos que demonstram que sistemas de wetlands híbridos podem ser aplicados em diferentes tipos de águas residuais como água

residual da produção de vinho (SERRANO et al., 2011), compostos farmacêuticos (REYES et al., 2011), água produzida em campos de petróleo (ALLEY et al., 2013), água cinza e efluentes industriais (COMINO et al., 2013; VYMAZAL, 2014). No Brasil, os primeiros ensaios com a utilização de WC no controle da poluição da água foram realizados no início de 1980 por Salati et al. (1999). Ainda de maneira incipiente, outros autores investigaram a utilização de espécies de *Typha* spp e *Eleocharis fistulosa* no tratamento de efluentes domésticos e com origem agrícola durante a década de 1990 (CONTE et al., 1992; AMORIM et al., 1997; PHILIPPI et al., 1999). Contudo, somente a partir do ano 2000, as pesquisas em relação às WC tornaram-se mais frequentes e profundas ao longo de todo o território brasileiro, de modo a avaliar suas diferentes possibilidades de configuração, diferentes tipos de águas residuais para tratamento e materiais utilizados como meio filtrantes. As características de dimensionamento de cada sistema são bastante heterogêneas e estão condicionadas à região na qual estão instaladas, como por exemplo, a disponibilidade de materiais a serem empregados como meio filtrante, a taxa hidráulica do afluente e a escolha do tipo de plantas utilizadas no tratamento (SEZERINO et al., 2015).

De acordo com a revisão de literatura realizada por Machado et al. (2016), a maior parte dos projetos de WC em território nacional se concentram nos estados de Santa Catarina, São Paulo e Minas Gerais. A configuração de WC mais utilizada é a de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal (WC-FSSH), ainda em escala piloto, utilizando cascalho, areia ou uma mistura dos dois como meio filtrante e o tipo de efluente mais tratado por esse método são águas residuais municipais provenientes do tratamento secundário ou terciário. Idealmente, as WC apresentam maior eficiência quando desempenham o papel de tratamento de afinamento ao receber afluentes com carga orgânica reduzida, entretanto, Silveira et al. (2015) demonstraram a utilização do sistema de WC francês de escoamento vertical para o tratamento de efluentes brutos, ou seja, sem nenhum tratamento prévio.

As experiências de pesquisa brasileira relativamente à utilização de WC têm estado bastante presentes no tratamento de efluentes domésticos gerados a partir de alojamentos universitários de diversos institutos. Nesse âmbito, Zanella et al. (2010) avaliaram a utilização de anéis de bambu como meio suporte em WC para o pós-tratamento de esgoto sanitário da universidade UNICAMP, em Campinas, São Paulo e obtiveram resultados satisfatórios quando comparados com a utilização de brita como meio suporte.

Avelino et al. (2011) também delinearam a construção de uma unidade de tratamento terciário baseado no sistema de WC para tratamento do efluente proveniente da faculdade UNESP em Bauru, São Paulo. Nesse projeto, foi avaliado com sucesso a utilização de isopor como material suporte. Tais estudos demonstram a importância de mais pesquisas na área que comparem a utilização de materiais de baixo custo e/ou materiais que estejam mais disponíveis na região, mas que cumprem o propósito esperado.

Santana et al. (2018), compararam o desempenho de duas unidades de WC no tratamento de esgoto sanitário, objetivando a remoção e/ou diminuição da toxicidade aguda de micro contaminantes emergentes, da cidade universitária da USP em São Paulo, nomeadamente: uma WC híbrida vertical-horizontal e uma WC com fluxo livre aerado seguido por decantador e uma WC de fluxo subsuperficial horizontal. Os resultados deste estudo revelaram que as duas configurações de tratamento foram eficientes

e não apresentaram diferença estatística na remoção dos contaminantes acetaminofeno, cafeína, diclofenaco e sulfametoxazol. A toxicidade aguda dos contaminantes também foi diminuída com sucesso.

Em águas residuárias de suinocultura na remoção de antibióticos veterinários enrofloxacina e ceftiofur, usaram WC plantado com *P. australis*, Santos et al. (2019a), obteve eficiência de 90%, no tratamento e ao mesmo tempo as bactérias resistentes também foram removidas pelo sistema. Ainda em tratamento de efluente proveniente da suinocultura mediante *wetlands* construídas de fluxo subsuperficial vertical, Sarmiento et al. (2012) observaram taxas significativas de remoção de nitrogênio e fósforo, além de alcalinidade e condutividade elétrica. Os autores ressaltam também a importância da espécie adequada de macrófita, para obter maiores remoções de macronutrientes e sódio do meio.

Para a aplicabilidade WC no tratamento de efluentes de bovinocultura de leite, Pelissari et al. (2014), obteve resultados satisfatórios na remoção de DQO, DBO, SS, N-H⁴ e P-PO⁴ -₃. Remoção de 58% de nitrogênio amoniacal e 59% Nitrogênio total

WC de fluxo superficial horizontal foi usada por Bortoletto et al. (2020), para tratamento de efluente da parboilização de arroz, levando em consideração o alto teor de matérias orgânicas e inorgânicas deste efluente, o sistema se mostrou bastante favorável na remoção do nitrogênio total.

Assim como no tratamento de efluentes com hormônio metiltestosterona para posterior utilização em piscicultura, Castanha (2019), usou resíduos de cervejaria e terra diatomácea como material filtrante, juntamente com macrófita emersa *Eleocharis mutata* (L.) em sistema de WC, os resultados do estudo foram extremamente positivos em relação a adequação dos parâmetros físico-químicos do efluente aos limites estabelecidos pelo CONAMA 430/2011 e também proporcionaram o desenvolvimento das macrófitas presentes no sistema.

Em um estudo realizado por Jalowski et al. (2021), trabalharam com sistema de *wetlands* de fluxo subsuperficial vertical para remoção de cafeína de efluentes através de leito de macrófita *V. zizanioides*, nesse estudo, observou-se que a remoção do poluente ocorreu nas folhas da planta e atestou-se que a fitorremediação é uma tecnologia sustentável para promover a remoção de cafeína de efluentes contaminados.

A capacidade das WCs, tem sido avaliada também na remoção de diversos metais, como menciona Lauriuchi et al. (2021) que comprovaram a eficiência de remoção de cobre e zinco de efluentes provenientes de tratamento secundário a partir de WC de fluxo vertical utilizando resíduos cerâmicos de construção civil como meio filtrante e cultivado com macrófitas *Eleocharis acutangula*, nativas do cerrado. A eficiência média de remoção de cobre foi de 99,6% %, enquanto para o zinco foi de 81,2% a 98,8%. Tais resultados indicam que o uso de materiais alternativos, como meios filtrantes, em WC apresenta enorme potencial para remoção de cobre e zinco.

Da mesma forma, Saeed et al. (2021), aferiu a remoção de zinco, cromo, níquel e chumbo, com sistemas de *wetlands* construídas híbridos, com materiais filtrantes orgânicos (coco-turfa) ou materiais de construção (tijolo, areia) e plantados com *Phragmites australis* ou *Chrysopogon zizanioides*, as WCs com material Coco-Turfa, e *Phragmites australis*, resultou em melhores resultados, porém os autores indicam

bons resultados nas WCs híbridas, tanto com matéria orgânicas como co-materiais de construção para remoção de metais pesados.

A água residual do curtume é composta por uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos e componentes de vários processos que podem poluir criticamente o meio ambiente, desta forma, Alemu et al. (2021) em seu estudo, usou rocha basáltica vesicular e espécies de plantas locais para estabelecer um sistema de wetlands construído, e investigar a eficiência do tratamento de efluentes de curtume. No estudo quatro unidades piloto foram vegetadas com *P. purpureum*, *T. domingensis*, *C. latifolius* e *E. pyramidalis*, e uma quinta unidade foi deixada sem vegetação. O vegetal *P. Purpureum* foi a que apresentou maior eficiência de remoção de cromo, DBO, DQO e sólidos suspensos totais, contudo as diferenças não foram estatisticamente significativas, e tirando a WC não vegetada, que apresentou resultados menores, todas as outras vegetações podem ser aplicadas com sucesso no tratamento efluentes de curtume.

Conforme a revisão de literatura realizada por Wagner et al. (2018), as WCs podem remover alguns compostos químicos das águas residuais da purga da torre de resfriamento, o que consiste na água que será drenada após ser utilizada em resfriamento de caldeiras com acúmulo de diversos compostos durante esse processo, sendo estes principalmente sais os quais enferrujam e oxidam as caldeiras, as WCs aumentam a eficiência físico-química da dessalinização e podem também contribuir para a dessalinização em si.

Outros estudos corroboram entre si, em diversos locais do mundo, usando variadas modalidades de sistemas, a eficácia da aplicação de wetlands construídas para tratamento de esgotos domésticos atuando na remoção de matéria orgânica carbonácea, em termos de DQO e sólidos suspensos totais, e na remoção de nutrientes como N, P, e K: Berglund et al. (2014), Jácome et al. (2016), Zhou et. al. (2017), Pelissari et. al. (2018), Riggio et al. (2018), Santos et al. (2018), Melo et al. (2019), Mazucato et al. (2020).

Além das diversas vantagens já apresentadas dos sistemas de WC para o tratamento de efluentes, Boratto et al. (2021) sinalizam que essa tecnologia apresenta também a grande mais-valia de incluir uma baixa emissão de carbono, justamente por reduzir significativamente a participação dos processos anaeróbios na degradação dos poluentes. Desse modo, a incorporação das WC na matriz sanitária do Brasil seria um caminho de grande viabilidade para cidades com até 20.000 habitantes. Esta medida, implica em uma enorme mudança estrutural que requer investimento, entretanto possui o potencial de reduzir as emissões de metano provenientes do tratamento convencional de efluentes em mais de 10% ou 67 milhões de toneladas de gás carbônico equivalente. Na prática e em termos de conversão dos créditos de carbono, essa redução representa a geração de aproximadamente 35 milhões de dólares por ano.

CONCLUSÃO

O uso do sistema de fitorremediação por fitoextração, denominada por Wetlands construídas (WC), tem demonstrado ser uma ferramenta robusta para diversos tipos de efluentes, sendo eles industriais ou domésticos, e apresenta diversas vantagens que incluem seu baixo custo de implementação, operação e simplicidade do processo aliados à alta eficiência da remoção de parâmetros como DQO, DBO, Poluentes,

Sólidos Solúveis Totais (SST) e Nutrientes solúveis.

Os valores e funções das wetlands naturais são inquestionáveis e consideradas de extrema importância para o equilíbrio dos ecossistemas podendo ser até mesmo consideradas metaforicamente como os “rins do mundo” pelo fato de possuírem a capacidade de filtragem e retenção de diversos tipos de contaminantes, evitando que esses compostos sejam transportados para aquíferos, nascentes e oceanos. Sabendo, no entanto, que desde o início do século XX a maioria desses ambientes naturais desapareceram devido à drenagem de suas terras ou secas ocasionadas por mudanças climáticas.

Diversos trabalhos na literatura têm mostrado a ampla capacidade de diversificação do processo, apresentando taxas de remoção de poluentes superiores a 90%, quando aplicados aos tratamentos de efluentes têxteis e de laticínios, por exemplo. As famílias de plantas mais utilizadas localmente são Typhaceae e Poaceae, com *Typha spp.* e *Cynodon spp.* sendo as espécies mais representativas.

É notório que no Brasil, os estados de Santa Catarina, São Paulo e Minas Gerais se sobressaem no uso de WC com ênfase no tratamento de efluentes domésticos. No entanto, ainda há um longo caminho a ser percorrido no que se refere a aplicação das WCs para o tratamento de efluentes industriais em larga escala.

Tendo isso em vista, faz-se necessário que a comunidade científica continue empenhada em otimizar cada vez mais a tecnologia das WCs, que basicamente busca mimetizar os processos naturais, de forma que sua aplicação possa contribuir para o tratamento descentralizado de efluentes garantindo o acesso às condições sanitárias básicas à indivíduos que vivem em locais afastados dos grandes centros urbanos.

REFERÊNCIAS

ALAM, S. M.. Constructed Wetlands—Australian Environmentally Friendly Natural Wastewater Treatment System: an ideal low-cost solution for bangladesh.: An Ideal Low-Cost Solution for Bangladesh. **International Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.4, n.4, p.48-64, 2019.

ALEMU, A.; GABBIYE, N.; LEMMA, B.. Evaluation of tannery wastewater treatment by integrating vesicular Basalt with local plant species in a constructed wetland system. **Front. Environ. Sci.**, v.9, 2021.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.721014>

ALLEY, B. L.; WILLIS, B.; RODGERS, J. J.; CASTLE, J. W.. Seasonal performance of a hybrid pilot-scale constructed wetland treatment system for simulated fresh oil field-produced water. **Wat Air Soil Pollut**, v.224, p.1-15, 2013.

AMORIM, R. F. C.; LEOPOLDO, P. R.; CONTE, M. L.. Sistemas de tratamento de esgotos domésticos utilizando taboa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE LIMNOLOGIA, 6. **Anais**. São Carlos: CBL., 1997.

AVELINO, M. C. G. S.; OLIVEIRA, E. L.; DREIFUS, T. V.; SANTOS, L. M.. Construção de uma estação de tratamento de esgoto na Unesp de Bauru/SP utilizando o sistema de alagados construídos. **Fórum Ambiental da Alta Paulista. ANAP**. v.7, n.12, p.1530-1538, 2011.

ÁVILA, C.; PELISSARI, C.; SEZERINO, P. H.; SGROI, M.; ROCCARO, P.; GARCÍA, J.. Enhancement of total nitrogen removal through effluent recirculation and fate of PPCPs in a hybrid constructed wetland system treating urban wastewater. **Science of the Total Environment**, v.584, p.414-425, 2017.

ÁVILA, C.; NIVALA, J.; OLSSON, L.; KASSA, K.; HEADLEY, T.; MUELLER, R. A.; BAYONA, J. M.; GARCÍA, J.. Emerging organic contaminants in vertical subsurface flow constructed wetlands: Influence of media size, loading frequency and use of active aeration. **Sci. Total Environ**, n.494-495, p.211-217, 2014.

AYAZ, S.; AKTAŞ, Ö.; FINDIK, N.. Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. **Ecol Eng**, v.40, p.1-5, 2012.

BERGLUND, B.; KHAN, G. A.; WEISNER, S. E. B.; EHDE, P. M.; FICK, J.; LINDGREN, P.. Efficient removal of antibiotics in surface-flow constructed wetlands, with no observed impact on antibiotic resistance genes. **Science of the Total Environment**, p.29 -37, 2014.

BORATTO, D. C.; BARRETO, A. B.; SEZERINO, P. H.; SOUZA, C. L.. Wetlands construídos empregados no tratamento de esgoto sob o contexto do saneamento de baixo carbono. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12 n.7, 2021.

- BORTOLETTO, E. C.; ALMEIDA J. V. C.. Avaliação do uso de wetland no tratamento do efluente da parboilização de arroz. **Brasilian Journal of development**, v.6, n.1, p.1395-1412, 2020.
- BRASIL. **Resolução do CONAMA n. 430**, de 13 de maio de 2011. Brasília: MMA, 2011.
- BRIX, H.; ARIAS, C. A.. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. **Ecol Eng.**, v.25, n.5, p.491-500, 2005.
- BURKEN, J. B.. VOCs Fate and Partitioning in Vegetation: Use of Tree Cores in Groundwater Analysis. **Environmental Science Technology**, v.36, n.21, p.4663-4668, 2002.
- CASTANHA, A. P. J.. **Uso de wetlands construídos na remoção de 17 α -metiltestosterona de águas de piscicultura**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2019.
- CHEN, Y.; VYMAZAL, J.; BŘEZINOVÁ, T.; KOŽELUH, M.; KULE, L.; HUANG, J.; CHENA, Z.. Occurrence, removal and environmental risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in rural wastewater treatment wetlands. **Science of the Total Environment**, v.566, p.1660-1669, 2016.
- COMINO, E.; RIGGIO, V.; ROSSO, M.. Grey water treated by an hybrid constructed wetland pilot plant under several stress conditions. **Ecol Eng.**, v.53, p.120-125, 2013.
- CONTE, M. L.; LEOPOLDO, P. R.; ZUCCARI, M. L.; DAMASCENO, S.. Tratamento de águas servidas no meio rural através do processo fitopedológico: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16. **Anais**. Santa Maria: SBEA, 1992.
- COOPER, P.. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. **Wat Sci Technol.**, v.40, p.1-9, 1999.
- CRINI, G.; LICHTFOUSE, E.. Wastewater treatment: **An overview. Green adsorbents for pollutant removal**, p.1-21, 2018.
- DOMINGOS, S. S.; DALLAS, S.; SKILLMAN, L.; FELSTEAD, S.; HO, G.. Nitrogen removal and ammonia-oxidising bacteria in a vertical flow constructed wetland treating inorganic wastewater. **Water Science & Technology**, v.64, n.3, p.587-594, 2011.
- DOTRO, G.; LANGERGRABER, G.; MOLLE, P.; NIVALA, J.; PUIGAGUT, J.; STEIN, O.; SPERLING, M.. **Biological Wastewater Treatment Series: Treatment Wetlands**. Chennai: IWA, 2017.
- ESTRELA, M. A.; CHAVES, L. H. G.; SILVA, L. N.. Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados. **Revista Ceuma Perspectivas**, v.31, 2018.
- FAN, J.; LIANG, S.; ZHANG, B.. Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy. **Environm. Sci Pollut Res**, v.20, p.2448-2455, 2012.
- GHOLIPOUR, A.; ZAHABI, H.; STEFANAKIS, A. I.. A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment. **Chemosphere**, v.247, p.125966, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere>
- GUILTONNY, A. P.; PETIT, M. E.; MASOTTI, V.; MONNIER, Y.; MALLERET, L.; COULOMB, B.; LAFFRONT, I. S.. Selection of wilde macrophytes for use in constructed wetlands for phytoremediation of contaminant mixtures. **Journal of Environmental Management**, v.147, p.108-123, 2015.
- HASSAN, I.; CHOWDHURY, S. R.; PRIHARTATO, P. K.; RAZZAK, S. A.. Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential. **Process**, v.9, n.11, p.1917, 2021.
- HIJOSA, M. V.; MATAMOROS, V.; SIDRACH, R. C.; PEDESCOLL, A.; MARTIN, J. V.; GARCIA, J.. Influence of design, physico-chemical and environmental parameters on pharmaceuticals and fragrances removal by constructed wetlands. **Water Sci. Technol.**, v.63, n.11, p.2527-2534, 2011.
- IWA. International Water Association. **Specialist group on use of macrophytes in water pollution control: Constructed wetlands for pollution control**. Londres: International Water Association Publishing, 2012.
- JÁCOME, J. A.; MOLINA, J.; SUÁREZ, J.; MOSQUEIRA, G.; TORRES, D.. Performance of constructed wetland applied for domestic wastewater treatment: Case study at Boimorto (Galicia, Spain). **Ecological Engineering**, p.324-329, 2016.
- JALOWSKI, B. J.; JUNKES, B. S.; BORRALHO, T.; ALMEIDA, A.. Remoção de cafeína de efluentes através de leito de macrófita de fluxo subsuperficial vertical plantado com *Vetiveria zizanioides*. **Revista Técnico Científica do Instituto Federal de Santa Catarina**, v.1, n.10, 2020.
- KIFLAY, E.; SELEMANI, J.; NJAU, K.. Integrated constructed wetlands treating industrial wastewater from seed production. **Water Practice & Technology**, v.16, n.2, p.504-515, 2021.
- KHAN, H. N.; FAISAL, M.. Phytoremediation of industrial wastewater by hydrophytes. In: **Phytoremediation**, p.179-200, 2018.
- KRUTZ, L. J.; BURKE, I. C.; REDDY, K. N.; ZABLOTOWICZ, R. M.; PRICE, A.. Enhanced atrazine degradation: evidence for reduced residual weed control and a method for identifying adapted soils and predicting herbicide persistence. **Weed Science**, v.57, n.4, p.427-434, 2009.
- LANGERGRABER, G.; PRANDTSTETTEN, C. H.; PRESSL, A.; ROHRHOFER, R.; HABERL, R.. Optimization of subsurface vertical flow constructed wetlands for wastewater treatment. **Wat Sci Technol**, v.55, p.71-78, 2007.
- LAURIUCHI, G. A.; LIMA, M. H.; BERTOLINO, S. M.. Remoção de cobre e zinco em wetland construídos de fluxo vertical com resíduo de cerâmica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.9, 2021.
- LI, C.; WU, S.; DONG, R.. Dynamics of organic matter, nitrogen and phosphorus removal and their interactions in a tidal operated constructed wetland. **J Environ Manag.**

v.151, p.310-316, 2015.

MACHADO, A. I.; BERETTA, M.; FRAGOSO, R.; DUARTE, E.. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.187, p.560-570, 2016.

MATOS, M. P.; SPERLING, M. MATOS, A. T.; PASSOS, R. G.. Uso de traçador salino para avaliação da colmatção e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.35, n.6, p.1137-1148, 2015.

MAZUCATO, V. S. H.; SANTOS, V. B.; CAVALHERI, P. S.; MAGALHÃES, F. J. C. F.. Comportamento de wetland construído de fluxo vertical com fundo parcialmente saturado na remoção de matéria orgânica nitrogenada e fósforo. **Brasilian Journal of Development**, v.6, n.8, p.56506-56520, 2020.

MELO, A. S. J.; NASCIMENTO, P. C.; DIAS, C. J.; RIBEIRO, K. A.; MERIJ, A. C.; GAMA, S. M.. Qualidade no tratamento de esgoto doméstico por wetland construídos. **Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation**, v.7, n.1, p. 20-39, 2019.

PAING, J.; GUILBERT, A.; GAGNON, V.; CHAZARENC, F.. Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: a survey based on 169 full scale systems. **Ecol Eng**, v.80, p.46-52, 2015.

PELISSARI, C.; GUIVERNAU, M.; ÁVILA, C.; VIÑAS, M.; GARCÍA, J.; SEZERINO, P. H.. Influência de parâmetros operacionais sobre as populações oxidantes de amônia e desnitrificante em wetland construído vertical. **Tecno-Lógica**, v.22, n.1, p.1-5, 2018.

PELISSARI, C.; SEZERINO, P. H.; DECEZARO, S. T.; WOLFF, D. B.; BENTO, A. P.; JUNIOR, O. DE C.; PHILIPPI, L. S.. Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil. **Ecological Engineering**, v.73, p.307-310, 2014

PHILIPPI, L. S.; COSTA, R. H. R.; SEZERINO, P. H.. Domestic effluent treatment through integrated system of septic tank and root zone. **Water Science and Technology**, v.40, n.3, p.125-131, 1999.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R.. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v.21, n.2, p.335-341, 2003.

PLATZER, C.; HOFFMANN, H.; MIGLIO, R. M.. Long term experiences with dimensioning and operation of vertical flow constructed wetlands in warm climate regions of South America. In: INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION CONFERENCE. **Proceedings**. Gdansk, 2016.

POLIŃSKA, W.; KOTOWSKA, U.; KIEJZA, D.; KARPIŃSKA, J.. Insights into the Use of Phytoremediation Processes for the Removal of Organic Micropollutants from Water and Wastewater; A Review. **Water**, v.13, n.15, p.2065, 2021.

PROCHASKA, C.; ZOUBOULIS, A.; ESKRIDGE, K.. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected

by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage. **Ecol Eng**, v.31, p.57-66, 2007.

RANIERI, E.; VERLICCHI, P.; YOUNG, T. M.. Paracetamol removal p in subsurface flow constructed wetlands. **Journal of Hydrology**, v.404, n.3-4, p.130-135, 2011.

REYES-CONTRERAS, C.; MATAMOROS, V.; RUIZ, I.; SOTO, M.; BAYONA, J. M.. Evaluation of PPCPs removal in a combined anaerobic digester-constructed wetland pilot plant treating urban wastewater. **Chemosphere**, v.84, p.1200-1207, 2011.

RIGGIO, V. A.; RUFFINO, B.; CAMPO, G.; COMINO, E.; COMOGLIO, C.; ZANETTI, M.. Constructed wetlands for the reuse of industrial wastewater: A case-study. **Journal of Cleaner Production**, p.723-732, 2018.

RUBINGER, C. F.. **Seleção de métodos biológicos para a avaliação toxicológica de efluentes industriais**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SALATI, J. E.; SALATI, E.; SALATI, E.. Wetlands projects developed in Brazil. **Water Science and Technology**, v.40, n.3, p.19-25, 1999.

SANTANA, N. S.; COLOMBO, R.; BORRELY, S. I.; ANDRADE, H. H. B.; NOLASCO, M. A.. Remoção de toxicidade e microcontaminantes emergentes em esgoto sanitário tratado em wetlands construídos. CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOTOXICOLOGIA, 15. **Anais**. Aracaju, 2018.

SANTOS, F.; ALMEIDA, C. M. R.; RIBEIRO, I.; MUCHA, A. P.. Potential of constructed wetland for the removal of antibiotics and antibiotic resistant bacteria from livestock wastewater. **Ecol. Eng.**, v.129, p.45-53, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.007>.

SANTOS, M. F. N.; ENOKIBARA, M.; OLIVEIRA, E. L.. Projeto e avaliação de custos de um sistema compacto de wetlands construídos para habitação social no município de Bauru-SP. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v.7, n.52, p.1-14, 2019b.

SANTOS, M. O.; PELISSARI, C.; ROUSSO, B. Z.; FREITAS, M. N.; SEZERINO, P. H.. Avaliação dos primeiros anos de operação de um Wetlands construído vertical de fundo saturado aplicado no tratamento de esgoto sanitário, Santa Cruz do Sul. **Tecno-Lógica**, v.22, n.1, p.25-29, 2018.

SARMENTO, A. P.; BORGES, A. C.; MATOS, A. T.. Evaluation of vertical-flow constructed wetlands for swine wastewater treatment. **Water, Air & Soil Pollution**, v.223, n.3, p.1065-1071, 2012.

SCHOLZ M.. **Wetland systems: storm water management control**. London: Springer, 2011.

SAEED, T.; ALAM, M. K.; MIAH, M. J.; MAJED, N.. Removal of heavy metals in subsurface flow constructed wetlands: Application of effluent recirculation. **Environmental and Sustainability Indicators**, v.12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100146>

SERRANO, L.; VARGA, D.; RUIZ I.; SOTO, M.. Winery

wastewater treatment in a hybrid constructed wetland. **Ecol Eng.**, v.37, p.744-753, 2011.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, S. T.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S.. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Eng Sanit Ambient.**, v.20, n.1, p.151-158, 2015.

SEZERINO, P. H.; ROUSSO, B. Z.; PELISSA R. C.; SANTOS, M. O.; FREITAS, M. N.; FECHINE, V. Y.; LOPES, A. M. B.. **Wetlands Construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção.** Florianópolis: FUNASA, 2018.

SILVA, B. H.; PIRES, L. J.. Utilização de adsorvente natural da Amazônia como bioadsorvente para remoção de metais em soluções aquosas. **Revista Acadêmica Discente de Marabá**, n.3, 2014.

SILVA, E. S.; LISBOA, F. D.; WERLANG, L. M.. Caracterização e acompanhamento da qualidade do efluente em indústrias de bebidas: Um estudo de caso. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20. **Anais.** Bento Gonçalves, 2013.

SILVA, T. J.; HANSTED, F.; TONELLO, P. S.; GOVEIA, D.. Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais: Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais. **Rev. Virtual Quim.**, n.11, v.1, p.18-34, 2019.

SILVEIRA, D. D.; BELLI, P. F.; PHILIPPI, L. S.; KIM, B.; MOLLE, P.. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v.77, p.257-264, 2015.

SONG, X.; DING, Y.; WANG, Y.; WAN, W.; WANG, G.; ZHOU, B.. Comparative study of nitrogen removal and bio-film clogging for three filter media packing strategies in vertical flow constructed wetlands. **Ecol Eng.**, v.74, p.1-7, 2015.

STEFANAKIS, A.; AKRATOS, C. S.; TSIHRINTZIS, V. A.. **Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment.** Oxford: Newnes, 2014.

TAN, L.; HE, M.; SONG, L.; FU, X.; SHI, S.. Aerobic decolorization, degradation and detoxification of azo dyes by a newly isolated salt-tolerant yeast *Scheffersomyces spartinae* TLHS-SF1. **Bioresource Technology**, v.203, p.287-294, 2016.

TRIPATHI, D.. Constructed Wetlands for Pharmaceutical Wastewater Treatment: A Review. **International Journal of Prevention and Control of Industrial Pollution**, v.7, n.1, p.22-41, 2021.

TSIHRINTZIS, V. A.; AKRATOS, C. S.; GIKAS, G. D.; KARAMOUZIS, D.; ANGELAKIS, A.. Performance and cost comparison of a FWS and a VSF constructed wetland system. **Environ Technol.**, v.28, p.621-628, 2007.

TUNÇSIPER, B.. Nitrogen removal in a combined vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetland system. **Desalination**, v.247, p.466-475, 2009.

VARMA, M.; GUPTA, A. K.; GHOSAL, P. S.; MAJUMDER, A.. A review on performance of constructed wetlands in tropical

and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature.

Science of The Total Environment, v.755, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142540>

VASCONCELLOS, M. C.; PAGLIUSO, D.; SOTOMAIOR, V. S.. Phytoremediation: A proposal of soil decontamination. **Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade**, v.34, n.83, p.261-267, 2012.

VYMAZAL, J.. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecol Eng.**, v.25, p.478-490, 2005.

VYMAZAL, J.. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. **Ecol Eng.**, v.61, p.582-592, 2013.

VYMAZAL, J.. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. **Ecol Eng.**, v.73, p.724-751, 2014.

VYMAZAL, J.; GREENWAY, M.; TONDESKI, K.. **Constructed wetlands for wastewater treatment, ecological studies.** Berlin: Springer-Verlag, 2006.

VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L.. **Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow.** Dordrech: Springer Science, 2008.

VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L.. A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: first 2 years of operation. **Ecol Eng.**, v.37, p.90-98, 2011.

VYMAZAL, J.; ZHAO, Y.; MANDER, Ü.. Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. **Ecological Engineering**, v.169, p.1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>

WAGNER, T. V.; PARSONS, J. R.; RIJNAARTS, H. H. M.; VOOGT, P.; LANGENHOFF, A. A. M.. A review on the removal of conditioning chemicals from cooling tower water in constructed wetlands. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.48, p.19-21, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1512289>.

WANG, M.; ZHANG, D.; DONG, J.; TAN, S. K.. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review. **Hydrobiologia**, v.805, n.1, p.1-31, 2018.

WEI, Z.; LE, Q. V.; PENG, W.; YANG, Y.; YANG, H.; GU H.; LAM, S. S.; SONNE, C.. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. **Journal of Hazardous Materials**, v.403, 2021.

WU, S.; KUSCHK, P.; BRIX, H.; VYMAZAL, J.; DONG, R.. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review. **Wat Res.**, v.57, p.40-55, 2014.

ZANELLA, L.; NOUR, E.; ROSTON, D.. Use of bamboo rings as substrate in subsuperficial constructed wetland system in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLAND SYSTEMS FOR WATER POLLUTION CONTROL. **Proceedings.** Venice, 2010.

ZHANG, D. Q.; JINADASA, K. B. S. N.; GERSBERG, R. M.; LIU, Y.; NG, W. J.; TAN, S. K.. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries—a review of recent developments (2000-2013). **Journal of Environmental Management**, v.141, p.116-131, 2014.

ZHOU, X.; WANG, X.; ZHANG, H.; WU, H.. Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland. **Bioresource Technology**, p.269-275, 2017

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157839587685433345>