

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **DESEMPENHO DE UM SISTEMA FLUTUANTE DE WETLAND CONSTRUÍDO EM MESOCOSMO: REMOÇÃO DE NUTRIENTES SOB CARGA DE CHOQUE E OSCILAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA**

Joana Postal Pasqualini <sup>1</sup>; Jucimara Andreza Rigotti <sup>2</sup> & Lucia Ribeiro Rodrigues <sup>3</sup>

**Abstract:** Constructed Floating Wetlands (CFW) can be employed to remove nutrients from aquatic environments. A CFW was developed in mesocosms at the Hydraulic Research Institute of the Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, aiming the evaluation of the system's functionality in treating synthetic effluents with nutrient concentrations simulating urban runoff. Two emergent macrophyte species were used, *Typha domingensis* Pers. and *Schoenoplectus californicus*. CFW was evaluated under changes in nutrient concentration and water level identified as "shock loading" to simulate extreme rainfall events, accidental pollutant spills or illegal discharges, common in drainage systems and rivers. Comparative evaluations between species and system responses were evaluated at different hydraulic retention times (HRT). Climatological variables were investigated. Solar radiation showed positive and significant correlations ( $p < 0.05$ ) with total nitrogen and orthophosphate. Orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) showed significant ( $p < 0,05$ ) differences between initial and final concentrations after the first 24h. The 4h shock load showed significant ( $p < 0,05$ ) differences between the initial and final concentrations for total nitrogen, for total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC). As for the final lot, significant differences were found between the entry shock load and the exit values for NT, PT,  $\text{PO}_4^{3-}$  and for TOC. After 6 days, the mean removal rates for NT were around 28% for *S. californicus* and 87% for *T. domingensis*, for PT such removals were 29% and 55%, respectively. The superior root development of *T. domingensis* in association with the biofilm in the rhizosphere of the plants was responsible for the better efficiency during the experiments.

**Resumo:** Sistemas flutuantes de *wetlands* construídos (SFWC) são empregados na remoção de nutrientes de ambientes aquáticos. Um SFWC foi desenvolvido em mesocosmos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, para avaliar a funcionalidade do sistema no tratamento de efluentes sintéticos com concentrações de nutrientes simulando o escoamento superficial urbano. Duas espécies de macrófitas emergentes foram utilizadas, *Typha domingensis* Pers. e *Schoenoplectus californicus*. O SFWC foi avaliado sob mudanças na concentração de nutrientes e nível da água, caracterizando a "carga de choque", que simula eventos extremos de chuva, derramamentos acidentais de poluentes ou descargas ilegais, comuns em sistemas de drenagem e rios urbanos. Foram avaliadas variáveis

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 91501-970, e-mail: [joanapasqualini@gmail.com](mailto:joanapasqualini@gmail.com)

2) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR. e-mail: [anrigotti@gmail.com](mailto:anrigotti@gmail.com)

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 91501-970, e-mail: [luciarrodrigues@gmail.com](mailto:luciarrodrigues@gmail.com)

climatológicas e foram feitas comparações entre as espécies e respostas do sistema em diferentes tempos de retenção hidráulica (TRH). A radiação solar apresentou correlações positivas e significativas ( $p < 0,05$ ) com o nitrogênio total (NT) e com o ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Após as primeiras 24h,  $\text{PO}_4^{3-}$  apresentou diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre as concentrações iniciais e finais. Após 4h demonstrou diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para NT, fósforo total (TP) e carbono orgânico total (COT). No lote final as diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) foram para NT, PT,  $\text{PO}_4^{3-}$  e COT. As taxas médias de remoção para NT foram de 28% para *S. californicus* e 87% para *T. domingensis*, para PT tais remoções foram de 29% e 55%, respectivamente. O desenvolvimento radicular superior de *T. domingensis* em associação com o biofilme na rizosfera foi responsável pela melhor eficiência durante a realização dos experimentos.

**Palavras-Chave** – sistema flutuante de *wetlands* construídos, ecotecnologia, soluções baseadas na natureza

## INTRODUÇÃO

O emprego de técnicas compensatórias para o manejo de águas urbanas está em consonância com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) proposto pela Organização das Nações Unidas. O entendimento da performance destas práticas é relevante para a avaliação de critérios de projeto e eficiência, os quais são fatores influenciadores na aprovação dos usos destes dispositivos (LIKITSWAT *et al.*, 2023).

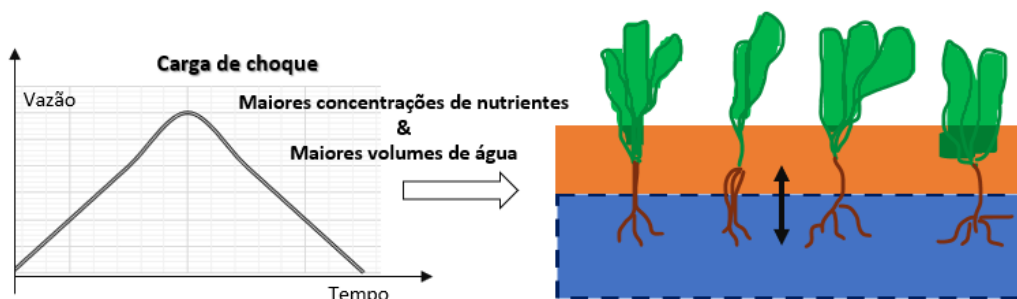
Além da procura por tecnologias adequadas com baixo investimento e custo de manutenção, é interessante a busca por bons níveis de performance, principalmente, quanto à remoção de nitrogênio e fósforo, elementos essenciais no processo de eutrofização de corpos d'água receptores. Sistemas flutuantes de *wetlands* construídos (SFWC) têm mostrado alta capacidade de transformar, reciclar, reter e remover diferentes tipos de poluentes, especialmente os nutrientes eutrofizantes (COLARES *et al.*, 2020), e orgânicos (TANNER; HEADLEY, 2011), com base nos processos naturais (filtração, sedimentação, adsorção/absorção, biodegradação) que ocorrem nos biofilmes microbianos formados entre a rizosfera e o substrato sólido (TANNER; HEADLEY, 2011). Estimativas confiáveis acerca do desempenho destes sistemas continuam sendo uma lacuna de pesquisa (LIKITSWAT *et al.*, 2023; SCHWAMMBERGER *et al.*, 2023; ZHAO *et al.*, 2020). Logo, a análise das eficiências de remoção em experimentos de mesocosmos (RIGOTTI *et al.*, 2021) visa avaliar as concentrações de entrada e saída, a fim de gerar um diagnóstico quantitativo dos mecanismos de remoção envolvidos no sistema.

O amortecimento e tratamento do escoamento superficial urbano se mostra essencial para recuperar ou manter minimamente a biodiversidade aquática, uma vez que os picos de vazão, além de possuírem maior intensidade, ocorrem de forma mais frequente em áreas urbanas (WALSH *et al.*, 2005). Assim, torna-se pertinente o estudo dos desafios da eficiência da implantação dos SFWC sob uma situação de estresse, como por exemplo, a encontrada no *first flush*, devido à elevada carga de poluentes presentes no início de um evento de chuva (CHARTERS *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2021).

Associado à tamanha variabilidade quali-quantitativa do escoamento superficial, Saeed (2016) descreve “cargas de choque” como o incremento repentino das concentrações em intervalos de tempo, ocasionado por eventos extremos de chuva, derrames acidentais de poluentes ou descargas ilegais (Figura 1). Desta forma, o termo “cargas de choque” foi aplicado no presente trabalho para designar as oscilações de concentração precisamente de nutrientes e

de nível d'água as quais um sistema natural pode estar susceptível. Neste contexto, o presente estudo visa contribuir para o preenchimento da lacuna existente na interface dos sistemas de drenagem urbana (micro-drenagem) e sua disposição final nos cursos d'água, através da investigação do efeito de cargas de choque em um sistema flutuante de *wetland* construído.

Figura 1 - Ilustração da entrada de carga de choque em um sistema flutuante de *wetland* construído



## MATERIAIS E MÉTODOS

Duas espécies de macrófitas emergentes, *Typha domingensis Pers.* e *Schoenoplectus californicus* foram selecionadas para atuarem no SFWC. O sistema foi exposto a efluentes sintéticos (Tabela 1), sendo a solução A, com concentrações de nutrientes simulando o escoamento superficial urbano e concentração B, com concentrações simulando uma onda de cheia (XU et al., 2021). Estudos demonstraram que ondas de cheia podem causar picos de concentração de nutrientes como nitrato, ortofosfato e fósforo total. A proporção dos reagentes utilizados foi adaptada da solução de cultivos hidropônicos de Furlani (1999), cuja proporção dos nutrientes essenciais baseia-se, por sua vez, na formulação de Hoagland e Arnon (1938). Esta formulação, e variações, é a base dos fertilizantes comerciais disponíveis para hidroponia, aplicados para elaborar os efluentes sintéticos usados em estudos com SFWC (Tanner e Headley 2011; Zhang et al. 2014; Geng et al. 2017). A água utilizada para a solução é água tratada para consumo. Segundo Furlani (1999), há algumas restrições quanto a qualidade da água utilizada, relativas aos cloretos e sulfatos. A utilização da solução sintética de nutrientes visa o maior controle das condições de entrada, minimizando a influência da variabilidade que ocorreria com a utilização de águas de drenagem ou efluentes domésticos.

Tabela 1 – Proporções dos reagentes para o preparo da solução sintética de nutrientes para as fases de adaptação e carga de choque.

	Nomenclatura	Solução A	Solução B
		Quantidade para 1000L (g)	Quantidade para 1000L (g)
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Nitrato de Cálcio	25,00	50,00
KNO <sub>3</sub>	Nitrato de Potássio	16,67	33,00
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Fosfato monoatômico	5,00	10,00
MgSO <sub>4</sub>	Sulfato de magnésio	13,17	26,00
CuSO <sub>4</sub>	Sulfato de cobre	0,01	0,01
ZnSO <sub>4</sub>	Sulfato de zinco	0,02	0,03
MnSO <sub>4</sub>	Sulfato de Manganês	0,05	0,10
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico	0,05	0,10
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub>	Molibdato de Amônio	0,01	0,01
FeDTA (ml)	Rexolin	0,77	2,00

Fonte: Furlani et al. (1999).

O experimento foi realizado em regime de batelada, com intervalo de duração total de 7 dias. As principais etapas são duas: (1) variação do nível d'água nos tanques e (2) aumento da concentração do efluente, o que define a carga de choque. Essa fase teve por objetivo simular uma onda de cheia ao sistema. A fim de comparar os efeitos da ausência/presença da estrutura flutuante preenchida pelas macrófitas, foram adicionadas duas réplicas de controle, por meio da adição de dois tanques de 130 Litros, os quais não possuíam macrófitas, além das duas réplicas de cada espécie de macrófita avaliada. O sistema era alimentado por um reservatório de 1.000 L que distribuía o efluente sintético entre os tanques-tratamento (Figura 2). Os experimentos foram realizados em duas repetições.

Figura 2 - Configuração do sistema flutuante de *wetland* construído em mesocosmos



Semanalmente a batelada era iniciada com a preparação do efluente sintético, e eram medidos parâmetros de qualidade da água in situ através de sonda multiparâmetros, como temperatura da água, potencial redox, condutividade elétrica, e oxigênio dissolvido. O sistema era, então, exposto por 24 horas a concentração inicial descrita em RIGOTTI et al. (2020). No dia seguinte, após coleta e medição dos parâmetros, o efluente dos tanques era descartado, e novas concentrações, referidas como cargas de choque eram introduzidas nos 6 tanques-tratamento, com elevação do nível da água de 20 centímetros para 40 centímetros. A partir deste momento, em 2 horas e em 4 horas, foram realizadas coletas, com o objetivo de quantificar as concentrações do efluente. Ao final das 4 horas, foi realizada redução do nível para 20 cm novamente, e dado prosseguimento à exposição dos 6 dias restantes da batelada, com coleta ao final.

As variáveis turbidez, cor e pH foram medidas imediatamente após a coleta no laboratório. Fósforo total (PT), ortofosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT) e clorofila-a também foram quantificados.

Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e análise de variância (ANOVA) para avaliar as diferenças de concentração entre os tratamentos (*T. domingensis* e *S. californicus*) e as condições (entrada e saída em diferentes intervalos de tempo: entrada, 24h, entrada carga de choque, 2 horas, 4 horas e ao fim de sete dias). Foi adotado nível de 0,05 de significância. O teste foi realizado com os parâmetros: fósforo total, ortofosfato, nitrogênio total e carbono orgânico total, para cada solução sintética separadamente. Além disso, foi realizada análise de coordenadas principais (CAP) para avaliar a resposta da espécie às diferentes etapas de exposição ao efluente sintético. Para esta análise multivariada, uma



normalização foi aplicada a todos os parâmetros medidos in situ e em laboratório e a distância euclidiana foi usada para construir a matriz de dissimilaridade. O programa estatístico PRIMER (versão 6.1.15) foi usado para executar a CAP. Por fim foi aferida a porcentagem de redução de nutrientes.

Na interpretação dos dados, foram também consideradas variações climáticas, as quais entraram na análise de variância, como a temperatura do ar, umidade e radiação solar de acordo com estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em geral, o sistema flutuante de *wetland* construído apresentou eficiências comprovadas estatisticamente para os maiores tempos de detenção do efluente, isto é, 7 dias. A avaliação das cargas de choque em períodos inferiores a uma semana é pouco encontrada em estudos similares, restringindo a discussão dos resultados. Por outro lado, revela-se uma lacuna científica a ser preenchida por estudos que visam a aplicação da ecotecnologia para menores tempos de retenção, geralmente encontrados em sistemas de drenagem urbana.

A partir da entrada da carga de choque, as concentrações de OD variaram de 6,5 mg/L (4 horas) até 8,7 mg/L (entrada carga de choque). Isso ocorre devido ao processo de inserção de oxigênio pelas macrófitas emergentes, podendo variar entre 5 a 45 gramas de oxigênio por dia em cada metro quadrado (MARQUES, 1999).

Na análise de variância, entre o efluente de entrada e as diferentes etapas da carga de choque, observou-se que o ortofosfato apresentou diferenças significativas entre as concentrações iniciais e finais, após as primeiras 24h (Tabela 2). A carga de choque demonstrou diferenças significativas entre as concentrações inicial e final para nitrogênio total, fósforo total e carbono orgânico total, mesmo para tempos de retenção de 4 h (Tabela 1). Ao final dos sete dias, foram identificadas diferenças significativas entre a carga de choque de entrada e os valores de saída para nitrogênio total, fósforo total, ortofosfato e carbono orgânico total.

A dinâmica do fósforo está relacionada aos sedimentos aquáticos, sendo que a retenção ou liberação a partir dele estão vinculadas às condições de pH, temperatura, atividade microbiana e condições de oxi-redução na interface água sedimento (JARVIE et al., 1998). Os sedimentos de *wetlands* naturais e lagoas é a principal rota para retenção de P a longo prazo, enquanto microorganismos e raízes retêm esse nutriente no curto prazo (BENVENUTI et al., 2018). Nos experimentos realizados neste estudo, as raízes das plantas combinadas às bactérias formaram um extenso biofilme que auxiliou o processo de adsorção para remover este nutriente (LUCKE et al., 2019).

Tabela 2 – Resumo dos resultados estatisticamente significativos avaliados através da análise de variância (95%) para cada etapa dos experimentos e principais parâmetros de qualidade da água

Etapa	NT	PT	Ortofosfato	COT
Entrada	-	-	-	-
Entrada 24h	-	-	p < 0,05	-
Entrada Carga de Choque	-	-	--	-
Carga de Choque 2h	-	-	-	p < 0,05
Carga de Choque 4h	p < 0,05	p < 0,05	-	p < 0,05

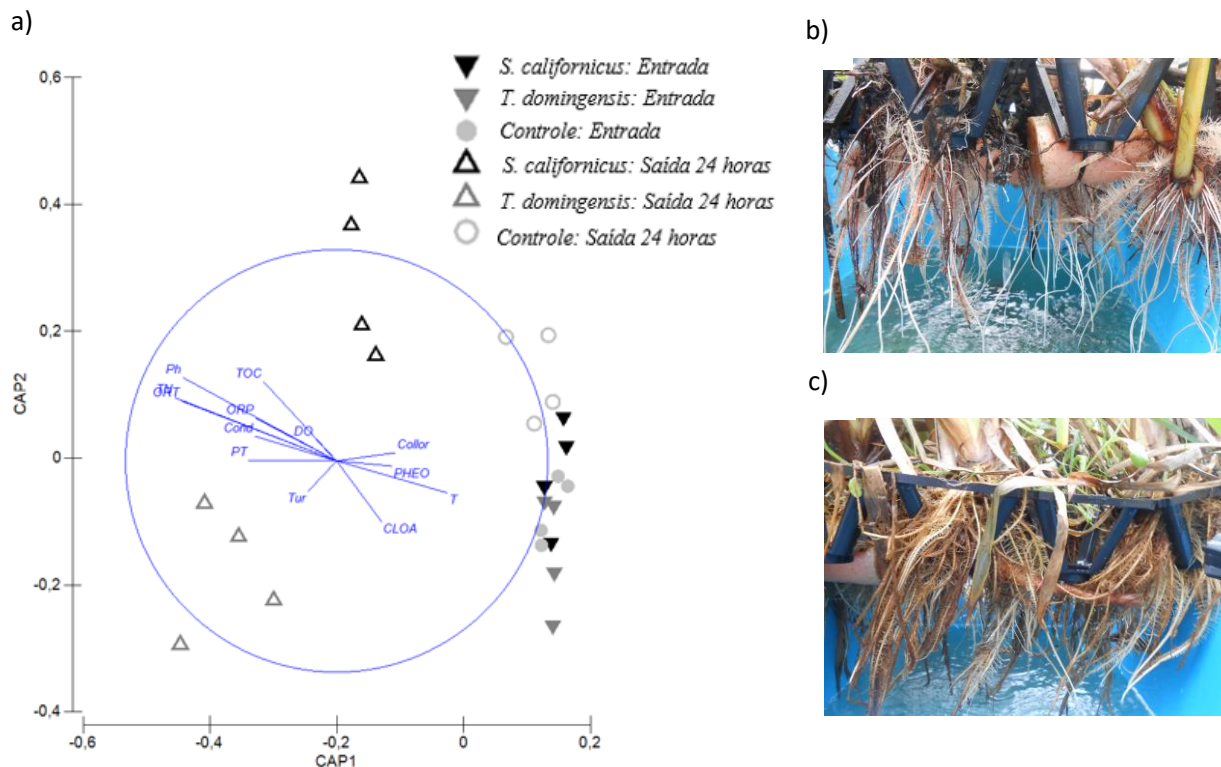
Carga de Choque Final	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,05$
-----------------------	------------	------------	------------	------------

NT = Nitrogênio total; PT = Fósforo total, COT = Carbono orgânico total,

Após 6 dias, as taxas médias de remoção para nitrogênio total foram aproximadamente 28% para *S. californicus* e 87% para *T. domingensis*. Quanto ao fósforo total, as remoções foram de 29% e 55%, respectivamente. O desempenho na redução de nutrientes entre as duas espécies de macrófitas avaliadas fica evidenciado na análise de componentes principais (Figura 3a). Os símbolos que representam os controles e as concentrações de entrada ficaram agrupados a direita do diagrama, já as amostras de saída ficaram separadas no diagrama, mostrando a diferença de remoção entre as espécies (*S. californicus* agrupada na parte superior e *T. domingensis* na parte inferior do diagrama (Figura 3a). Nesse sentido, identificou-se que *T. domingensis* (Figura 3c) apresentou crescimento de raízes superior a *S. californicus* (Figura 3b) (RIGOTTI et al., 2020; RIGOTTI et al., 2021), o que pode explicar a maior eficiência de remoção da *T. domingensis* (Figura 3 c).

Quanto aos fatores climatológicos, a radiação solar demonstrou correlações positivas e significativas ( $p < 0,05$ ) com o nitrogênio total e com o ortofosfato. Sabe-se que maior incidência de radiação solar pode intensificar a atividade microbiana e o processo fotossintético. A radiação solar também apresentou correlações positivas e significativas ( $p > 0,05$ ) com a temperatura da água e a condutividade elétrica.

Figura 3 -- a) Resultado da análise canônica de coordenadas principais (CAP) entre as amostras iniciais (triângulos não-hachurados) e após 24 horas (triângulos hachurados) para T = *T. domingensis* e S = *S. californicus* b) Imagem do desenvolvimento de raízes de *S. californicus* e de c) *T. domingensis*



Nota: Na CAP, as siglas correspondem aos parâmetros de qualidade da água, sendo eles: TOC = Carbono Orgânico Total; CLOA = Clorofila a; PT = Fósforo total; TN = Nitrogênio Total; Tur = Turbidez; DO = Oxigênio Dissolvido; ORP = Potencial redox; Cond = Condutividade Elétrica; PHEO = Feofitina; Collor = Cor; T = Temperatura da água

## CONCLUSÕES

Os resultados apontam os benefícios referentes ao serviço ecossistêmico associado ao sistema flutuante de *wetlands* construídos em mesocosmos. Em geral, o sistema flutuante de *wetland* construído apresentou eficiências comprovadas estatisticamente para os maiores tempos de detenção do efluente, caracterizado pela etapa final da carga de choque. Com remoção de nutrientes mesmo para baixos períodos de retenção, 4 h (para NT, PT e COT) e 2 h (para COT). Este resultado indica a viabilidade de aplicação dos SFWC em estruturas de amortecimento do escoamento superficial. Além do sistema de *wetlands* construídos estudado ser uma tecnologia com baixo investimento e custo de manutenção, o experimento apresentou também um bom nível de performance, principalmente, do nitrogênio e fósforo, elementos essenciais para evitar a eutrofização de corpos d'água que recebem a drenagem urbana.

O entendimento da performance destas práticas é relevante para a avaliação dos critérios de projeto e eficiência, determinantes no emprego destes dispositivos em escalas reais. Neste sentido, a avaliação do desempenho das técnicas compensatórias em situações controladas, como o experimento em mesocosmos, representa uma ferramenta indispensável para o conhecimento das vantagens e limitações desta ecotecnologia e o consequente aprimoramento técnico necessário para a viabilidade de implantação. Por exemplo, a aplicação com tempos de retenção no sistema inferiores a 4 h pode ser uma limitação da aplicabilidade do sistema em escala real.

## REFERÊNCIAS

- BENVENUTI, Tatiane et al. Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: a real-scale study. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 6, n. 5, p. 5706-5711, 2018.
- COLARES, Gustavo S. et al. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. **Science of the Total Environment**, v. 714, p. 136776, 2020.
- CHARTERS, Frances J.; COCHRANE, Thomas A.; O'SULLIVAN, Aisling D. The influence of urban surface type and characteristics on runoff water quality. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142470, 2021.
- FURLANI, Pedro Roberto et al. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1999.
- GENG, Yan et al. Effect of plant diversity on phosphorus removal in hydroponic microcosms simulating floating constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 107, p. 110-119, 2017.
- HOAGLAND, Dennis Robert et al. The water-culture method for growing plants without soil. **Circular. California agricultural experiment station**, v. 347, n. 2nd edit, 1938.
- JARVIE, H. P.; WHITTON, B. A.; NEAL, Colin. Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: speciation, sources and biological significance. **Science of the Total environment**, v. 210, p. 79-109, 1998.
- LIKITSWAT, Fa et al. Designing Ecological Floating Wetlands to Optimize Ecosystem Services for Urban Resilience in Tropical Climates: A Review. **Future Cities and Environment**, v. 9, n. 1, 2023.
- LUCKE, Terry; WALKER, Christopher; BEECHAM, S. Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: A review. **Science of the Total Environment**, v. 660, p. 199-208, 2019.
- MARQUES, D. de M. et al. Terras úmidas construídas de fluxo subsuperficial. In: **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES**. 1999. p. 409-435.
- RIGOTTI, Jucimara Andreza; PASQUALINI, Joana Postal; RODRIGUES, Lucia Ribeiro. Nature-based solutions for managing the urban surface runoff: an application of a constructed floating wetland. **Limnetica**, v. 39, n. 1, p. 441-454, 2020.
- RIGOTTI, Jucimara Andreza; PAQUALINI, Joana Postal; RODRIGUES, Lucia Ribeiro. Root growth and nutrient removal of *Typha domingensis* and *Schoenoplectus californicus* over the period of plant establishment in a constructed floating wetland. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 8927-8935, 2021.
- SAEED, Tanveer et al. Floating constructed wetland for the treatment of polluted river water: A pilot scale study on seasonal variation and shock load. **Chemical Engineering Journal**, v. 287, p. 62-73, 2016.
- SCHWAMMBERGER, Peter F. et al. Performance monitoring of constructed floating wetlands: Treating stormwater runoff during the construction phase of an urban residential development. **Science of The Total Environment**, v. 865, p. 161107, 2023.



TANNER, Chris C.; HEADLEY, Tom R. Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 3, p. 474-486, 2011.

XU, Jie et al. Variations of concentration characteristics of rainfall runoff pollutants in typical urban living areas. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 106, p. 608-613, 2021.

ZHANG, Chong-Bang et al. Comparison of effects of plant and biofilm bacterial community parameters on removal performances of pollutants in floating island systems. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 58-63, 2014.

ZHAO, Yaqian et al. Constructed treatment wetland: Glance of development and future perspectives. **Water Cycle**, v. 1, p. 104-112, 2020.