

AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE WETLANDS DE TRATAMENTO FLUTUANTES: EFEITO DA LARGURA RELATIVA EM CANAIS URBANOS

Maria Eduarda Magosso Pereira¹; Taís Natsumi Yamasaki²; Yasser Ismail Antunes Abder Rahman³; Paulo Henrique Silva de Lima⁴; Johannes Gérson Janzen⁵.

Abstract: Promoting an advancement in urban water quality, Floating Treatment Wetlands (FTWs) emerge as a promising solution. The present study applied Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations to investigate the impact of the relative width of the porous zone (FTW) on channel hydrodynamics. Four relative widths (25%, 50%, 75%, and 100% of the channel width) were analyzed. The results indicated that an increase in FTW width significantly impacts the flow pattern, leading to a progressive increase in average velocity both at the inlet and within the FTW. Consequently, the average residence time inside the island decreased with increasing width. This behavior was attributed to the increased obstructed area of the channel, which forces a larger fraction of the flow to pass through the structure, accelerating the flow even under the action of the porous medium's hydraulic resistance. These findings are crucial for optimizing the design of FTWs in urban environments, aiming to balance flow capture and contact time, thereby maximizing pollutant removal.

Resumo: Promovendo um avanço na qualidade da água em ambientes urbanos, as Wetlands de Tratamento Flutuantes (FTWs) apresentam-se como uma solução promissora. O presente estudo aplicou simulações em Fluidodinâmica Computacional (CFD) almejando investigar o impacto da largura relativa da zona porosa (FTW) na hidrodinâmica do canal. Foram analisadas quatro larguras relativas (25%, 50%, 75% e 100% da largura do canal). Os resultados apontaram que o acréscimo da largura da FTW gera significativo impacto no padrão de escoamento, propiciando um aumento progressivo na velocidade média tanto na entrada quanto no interior da FTW. Dessa forma, o tempo de residência médio no interior da ilha reduziu com o incremento da largura. Este comportamento foi atribuído ao aumento de área obstruída do canal, que força uma maior fração do fluxo a atravessar a estrutura, acelerando o escoamento, mesmo que sob a ação da resistência hidráulica do meio poroso. Estes achados são fundamentais para otimizar o design de FTWs em ambientes urbanos, visando equilibrar a captação de fluxo e o tempo de contato, maximizando a remoção de poluentes.

Palavras-Chave – Wetlands de Tratamento Flutuantes; CFD; Hidrodinâmica.

¹) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, (67) 99663-3241, dudamagosso2004@gmail.com

²) Postdoctoral Research Associate, Dept. of Geography, Durham Univ., Durham DH1 3LE, UK, tais.n.yamasaki@durham.ac.uk

³) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, (67) 984412783, yasserismail37@gmail.com

⁴) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, (67) 3345-7000, paulo.lima@ufms.br

⁵) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, (67) 3345-7000, johannes.janzen@ufms.br

1. INTRODUÇÃO

As wetlands de tratamento flutuantes (FTWs, do inglês Floating Treatment Wetlands) têm se consolidado, nas últimas décadas, como uma solução robusta, sustentável e de elevada eficiência para o tratamento de águas em corpos hídricos urbanos, particularmente córregos e canais (Colares *et al.*, 2020). Esses sistemas se destacam por uma série de vantagens operacionais e estruturais, incluindo menor demanda por áreas físicas (Wang *et al.*, 2020; Lucke *et al.*, 2019), custos reduzidos de implantação e operação (Bi *et al.*, 2019; Headley e Tanner, 2006), elevada resiliência frente às flutuações nos níveis da lâmina d'água (Yeh *et al.*, 2015; Headley e Tanner, 2012) e desempenho consistente na remoção de poluentes (Lucke *et al.*, 2019).

O princípio de funcionamento das FTWs é análogo ao de sistemas hidropônicos, nos quais plantas são mantidas sobre estruturas flutuantes enquanto suas raízes permanecem permanentemente submersas na coluna d'água (Headley e Tanner, 2012; Wang *et al.*, 2020). A eficácia desses sistemas na melhoria da qualidade da água decorre de processos sinérgicos que envolvem, simultaneamente, a absorção direta de nutrientes pelas plantas (Headley e Tanner, 2006), a atividade microbiológica associada aos biofilmes aderidos às raízes (Bi *et al.*, 2019) e a remoção física de sólidos suspensos, favorecida pela filtração e retenção mecânica promovida pela massa radicular (Schwammberger *et al.*, 2019; Headley e Tanner, 2012).

O desempenho funcional das FTWs, contudo, está intrinsecamente associado às condições hidrodinâmicas do ambiente onde são inseridas, que condicionam dois fatores determinantes para a eficiência dos processos de tratamento: (i) a fração de massa de poluentes que efetivamente adentra a zona radicular e (ii) o tempo de residência desse fluxo no interior dessa zona (Nuruzzaman *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2019; Lucke *et al.*, 2019; Xavier *et al.*, 2018). A otimização desses parâmetros hidrodinâmicos é, portanto, essencial para maximizar a eficiência dos processos biogeoquímicos envolvidos.

Entre os fatores geométricos e operacionais que modulam a hidrodinâmica — como comprimento, densidade e profundidade das estruturas flutuantes —, destaca-se a largura relativa da FTW em relação à largura do canal, a qual influencia diretamente tanto o volume reativo disponível quanto a fração do escoamento que efetivamente interage com a matriz de raízes. Estudos anteriores, como os de Liu *et al.* (2019), que avaliou FTWs ocupando 21% da largura do canal a partir de uma das margens, e Yamasaki *et al.* (2022), que modelou uma FTW ocupando toda a largura do canal, evidenciaram os efeitos da posição e extensão das FTWs sobre o escoamento. No entanto, permanece lacunar na literatura uma análise sistemática sobre como a variação da largura relativa das FTWs impacta a fração de fluxo que penetra na zona radicular e os tempos de residência associados.

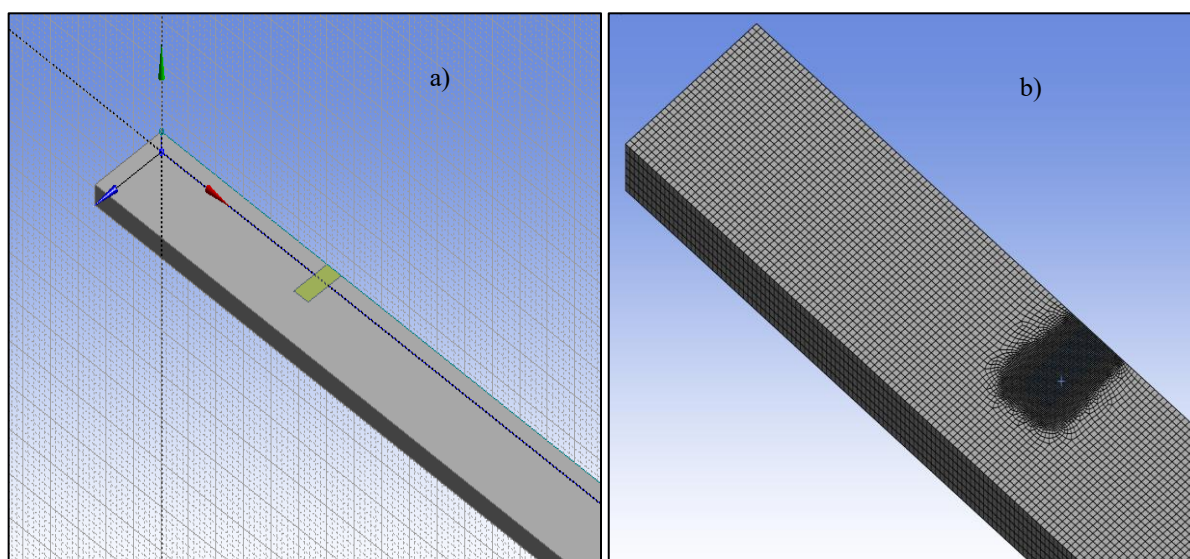
Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar, de forma quantitativa, a influência da largura da zona radicular sobre os processos hidrodinâmicos em FTWs instaladas em canais urbanos. Ao compreender as relações entre configuração geométrica e desempenho hidráulico, busca-se fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento dos critérios de projeto e operação desses sistemas, com vistas à maximização da eficiência na remoção de poluentes e à promoção de soluções mais eficazes para a gestão sustentável de águas urbanas.

2. METODOLOGIA

O domínio tridimensional simulado corresponde a um canal retangular contendo uma FTW, conforme ilustrado na Figura 1. As dimensões do canal foram definidas como comprimento $L=16$ m, largura $W=1,2$ m e profundidade $H=0,23$ m. O sistema de coordenadas cartesianas adotado tem sua origem localizada no fundo do canal, junto à parede lateral esquerda (Figura 1a), sendo o eixo-x

orientado no sentido longitudinal do escoamento, eixo-y na direção vertical (profundidade) e eixo-z transverso à largura do canal. As componentes das velocidades médias foram representadas por (u, v, w) (u, v, w, u', v', w'). Durante toda a simulação, considerou-se nível d'água constante.

Figura 1- (a) Geometria do modelo com 50% da largura ocupada pela zona porosa. (b) Malha do modelo composta predominantemente por elementos hexaédricos.



A FTW foi configurada ocupando larguras relativas ao canal de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00. As raízes foram modeladas com comprimento de 0,115m, equivalentes a metade da profundidade do canal, representando adequadamente a extensão submersa da zona radicular. Para garantir que o escoamento estivesse plenamente desenvolvido antes de interagir com a FTW, a borda de montante da estrutura flutuante foi posicionada a 3 metros da entrada do canal (Figura 1a).

A discretização espacial foi elaborada utilizando o software ANSYS Meshing, empregando uma malha não estruturada predominantemente composta por elementos hexaédricos. As dimensões dos elementos foram definidas como 0,04 m nas regiões externas à FTW e refinadas para 0,01 m no interior da zona radicular, conforme mostrado na Figura 1b. A definição da malha seguiu critérios de sensibilidade previamente estabelecidos no estudo de Yamasaki *et al.* (2022), validado por dados experimentais.

As simulações numéricas foram conduzidas no ANSYS Fluent v.19.5 (Ansys Inc., 2019), utilizando o método dos volumes finitos para resolver as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, garantindo a conservação local e global. Para a modelagem da turbulência, foi empregado o modelo Transition SST (Shear Stress Transport), que combina a robustez do modelo $k-\omega k-\omega$ nas regiões próximas às superfícies sólidas com a capacidade de capturar a transição entre regimes laminar e turbulento.

As condições de contorno foram especificadas da seguinte forma: na entrada do canal foi imposta uma condição do tipo velocity-inlet, com velocidade média uniforme de $U_0=9,8\text{cm/s}$; na saída, aplicou-se a condição pressure-outlet. As paredes laterais e o fundo do canal foram tratados como superfícies rígidas com condição de aderência total (no-slip), enquanto a superfície livre foi representada por uma condição de simetria (symmetry). O acoplamento entre as variáveis pressão e velocidade foi realizado por meio do algoritmo Coupled, e a discretização espacial utilizou o esquema de segunda ordem upwind, buscando maior precisão na resolução das equações diferenciais. Detalhes adicionais sobre os modelos físicos e os procedimentos numéricos adotados podem ser encontrados no manual do usuário do ANSYS Fluent (Ansys Inc., 2019).

A região correspondente à zona radicular da FTW foi representada como um meio poroso, adotando-se a abordagem proposta por Xavier *et al.* (2018). Esse método proporciona alta eficiência computacional, sendo particularmente adequado para simulações em escalas métrica e decamétrica, nas quais a representação geométrica explícita de cada raiz — com diâmetros na ordem de 10^{-3}m demandaria um custo computacional excessivo (De Lima *et al.*, 2015).

Nessa abordagem, as células do domínio que compõem a FTW foram atribuídas parâmetros de resistência hidráulica equivalentes às perdas de carga medidas em modelos experimentais (Figura 1a). A parametrização foi baseada nos experimentos conduzidos por Liu *et al.* (2019), que empregaram matrizes de cilindros rígidos para representar a densidade radicular da espécie *Eichhornia crassipes*, frequentemente utilizada em sistemas de tratamento tanto para remoção de nutrientes (Jayaweera e Kasturiarachchi, 2004) quanto para fitorremediação de metais (Jayaweera *et al.*, 2008).

A perda de carga no meio poroso foi quantificada utilizando a equação de Darcy-Forchheimer:

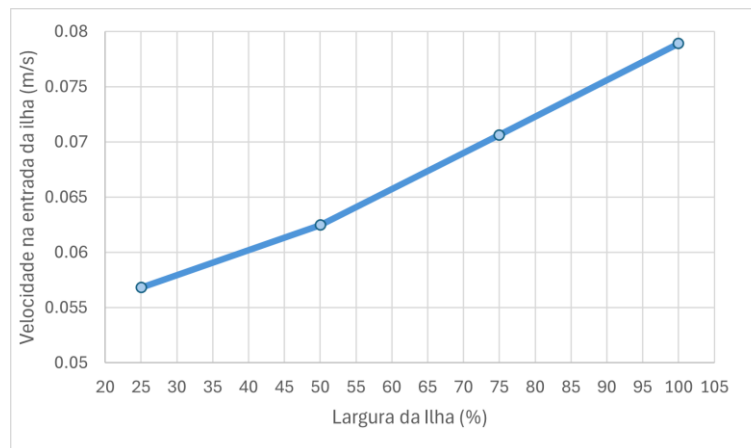
$$\Delta P = (\mu/\alpha) U + C_2 \rho U^2 \quad (1)$$

Onde $1/\alpha$ representa a resistência viscosa, e C_2 associada à permeabilidade do meio, corresponde ao coeficiente de perda inercial, que captura os efeitos não lineares do escoamento no interior do meio poroso (Irmay, 1958). Os valores dos coeficientes $1/\alpha$ e C_2 adotados foram os mesmos utilizados e validados no estudo de Yamasaki *et al.*, (2022), sendo respectivamente iguais a 70507.2 para os eixos X e Z, 365.5 para o eixo Y, e 73.2 para os eixos X e Z, 6.1 para o eixo Y.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compreender a hidrodinâmica no entorno e interior de Wetlands de Tratamento Flutuantes (FTW) é de suma importância para o aperfeiçoamento de seu desempenho na otimização de corpos hídricos urbanos. Este estudo delinea a análise quantitativa do impacto da largura relativa da zona radicular (FTW) sobre as características do escoamento. Os perfis de velocidade a montante da estrutura e em seu interior foram traçados para larguras relativas de 25%, 50%, 75% e 100% da largura total do canal.

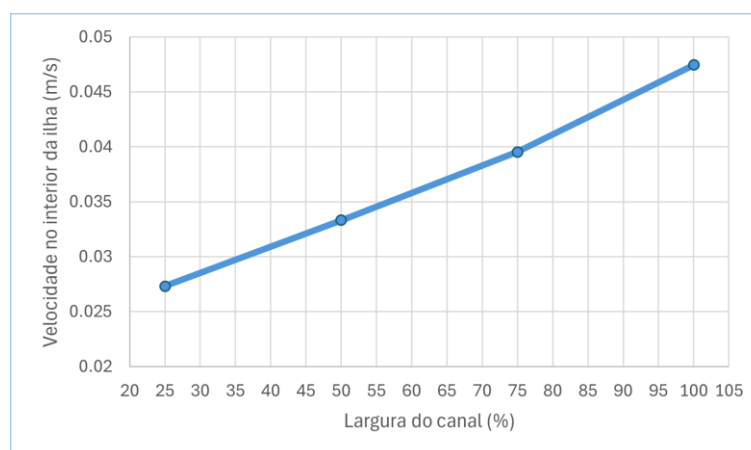
Figura 2- Velocidade Média na entrada da ilha (m/s) para os valores de largura relativa simulados.



A Figura 2 ilustra a relação entre a largura relativa da FTW e a velocidade média na seção de entrada da ilha. Verifica-se que a velocidade média na face de montante da FTW aumenta de maneira progressiva à medida que a largura da FTW aumenta. Para as menores larguras relativas, como 25%, a velocidade média de entrada foi de 0,0568 m/s. Este comportamento pode ser atribuído à redução de passagem livre para o escoamento do canal com o aumento da largura ocupada pela FTW, isto é, a alteração da largura da ilha afeta a fração que entra nela. Apoiando-se no princípio da continuidade, para uma vazão constante, ao aumentar a largura da ilha e por consequência a área de sua seção de entrada, é requerido pelo fluxo um aumento da velocidade através da FTW ou a canalização do fluxo pelas laterais pela maior restrição gerada. Logo, as ilhas que abrangem maiores porções da largura do canal, possuem a tendência de exigir que mais fluxo passe através da estrutura, elevando a velocidade local.

A pesquisa de Yamasaki *et al.* (2022) investiga a forma que a geometria da FTW, em especial, o comprimento da raiz submersa h/H , afeta a fração do fluxo do canal que adentra de maneira efetiva na FTW. Apesar destes achados destacarem o comprimento e não a largura, o princípio mostra-se análogo, ou seja, um aumento na dimensão da FTW que cause uma obstrução no canal, gera por consequência, uma alteração na forma de distribuição do fluxo. No contexto em estudo, ao aumentar a largura, exige-se que uma parcela maior do fluxo total do canal passe através da FTW, ao invés de contorná-la.

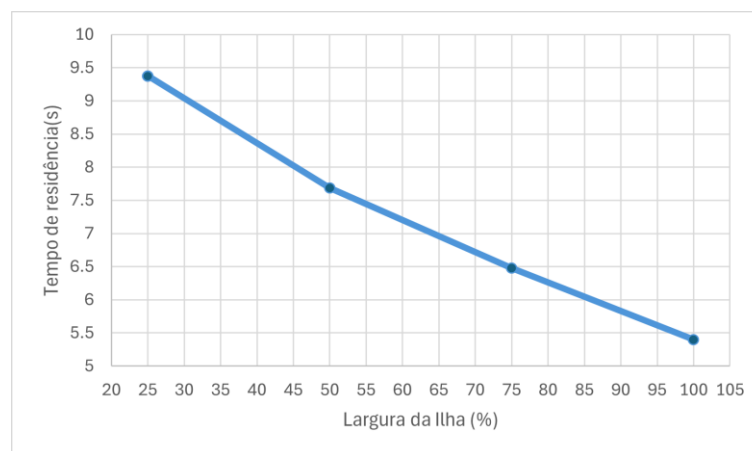
Figura 3 - Velocidade Média no interior da ilha (m/s) para os valores de largura relativa simulados.



De forma paralela, a Figura 3 exibe a variação da velocidade média volumétrica no interior da zona radicular das FTWs. Verifica-se que a velocidade no interior da zona porosa aumenta com o incremento da largura relativa. Conforme modelado pela equação de Darcy-Forchheimer, este comportamento pode ser explicado pela influência da resistência hidráulica imposta pelo meio

poroso. Para uma vazão de entrada constante, essa resistência provoca uma desaceleração do fluxo dentro da FTW em comparação com um canal aberto, ou que parte do fluxo seja desviada ao redor da ilha se houver espaço. No entanto, o aumento da velocidade média interna observada com o aumento da largura, explica que, embora haja uma resistência presente, o efeito da canalização e exigência de mais fluxo dentro da ilha (por uma maior área porosa causando restrição no canal) se mostra predominante, causando esta aceleração. Neste contexto, a resistência modula essa aceleração, ao garantir que a velocidade não seja tão elevada como seria em um meio de igual constrição, mas não poroso.

Figura 4 - Tempo de Residência(s) para os valores de largura relativa simulados.



A Figura 4 apresenta o tempo de residência médio no interior da FTW em função da largura relativa. Este parâmetro é fundamental, pois, em conjunto com o fluxo de massa de poluentes para o interior da FTW, proporciona a determinação da eficácia da remoção no sistema. O tempo de residência foi calculado de forma simplificada, com a razão entre o comprimento da FTW na direção do fluxo ($L = 0.256$ m), conforme utilizado por Yamasaki *et al.* (2022) e a velocidade média volumétrica no interior da zona porosa.

Observa-se que o tempo de residência diminui à medida que a largura relativa da ilha aumenta, uma vez que o comprimento da FTW é constante, esta tendência é inversamente proporcional à velocidade média no interior da ilha. A fim de garantir o tempo de contato necessário para as reações de primeira ordem, um tempo de residência adequado é crucial para maximização da absorção de nutrientes pelas plantas. Todavia, os resultados encontrados sugerem que o aumento da largura da FTW, reduzem o tempo de contato efetivo, por acelerar o fluxo interno na ilha, este aspecto foi indicado por Yamasaki *et al.* (2022) como um fator capaz de atenuar a remoção de poluentes, ainda que aumente a fração de fluxo que adentre a estrutura radicular.

Dessa forma, é evidente que a largura relativa da FTW exerce um efeito significativo sobre a hidrodinâmica, ao modular a velocidade do escoamento na entrada da estrutura e a velocidade e o tempo de residência no interior da zona porosa. Os resultados indicam que larguras maiores podem aumentar a velocidade de entrada e diminuir o tempo de residência como consequência de um aumento da velocidade interna, o que possibilita a existência de implicações para a remoção de poluentes. Otimizar estes parâmetros hidrodinâmicos é imprescindível para maximizar a eficiência dos processos biogeoquímicos. Ao compreender as relações entre a configuração geométrica e o desempenho hidráulico, este estudo fornece contribuições técnicas para o desenvolvimento dos

fundamentos de projeto e operação de FTWs, visando maximizar a eficiência na remoção de poluentes, com o avanço de soluções mais eficazes para a gestão sustentável de águas urbanas.

4. CONCLUSÃO

Este estudo realizou a investigação numérica da influência da variação de larguras em Wetlands de Tratamento Flutuantes (FTWs) na hidrodinâmica de canais, analisando seu impacto nas velocidades de escoamento e no tempo de residência médio do fluido para larguras de 25%, 50%, 75% e 100% da largura do canal. Os resultados revelaram que o aumento da largura relativa da FTW modula o padrão de escoamento de maneira significativa, resultando em um aumento progressivo na velocidade média tanto na seção de entrada da ilha quanto em seu interior. Por consequência, para o comprimento constante da FTW ($L = 0.256$ m), o tempo de residência médio no interior da FTW sofreu uma redução com o aumento da largura relativa. Este comportamento é atribuído ao aumento da obstrução do canal pela FTW, que provoca uma maior fração do fluxo a atravessar a estrutura e acelera o escoamento, ainda que sob a resistência hidráulica do meio poroso modelada pela equação de Darcy-Forchheimer cujos coeficientes foram utilizados de Yamasaki *et al.* (2022). Um menor tempo de residência, mesmo que com o aumento do fluxo de entrada, possibilita implicações para o processo de remoção de poluentes, indicando a exigência de otimização do projeto da FTW visando equilibrar esses fatores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a) Artigo em revista

BI, R.; ZHOU, C.; JIA, Y.; WANG, S.; LI, P.; REICHWALDT, E.; LIU, W. (2019). “Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands”. *Journal of Environmental Management* 238, pp. 484-498.

COLARES, G.S., DELL’OSBEL, N., WIESEL, P.G., OLIVEIRA, G.A., LEMOS, P.H.Z., DA SILVA, F.P., LUTTERBECK, C.A., KIST, L.T., MACHADO, E.L., (2020). “Floating treatment wetlands are view and bibliometric analysis”. *Sci. Tot. Env.* 714.

DE LIMA, P.H.S., JANZEN, J.G., NEPF, H.M., (2015). “Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth”. *Environ. Fluid Mech.* 15 (4), 881–898.

HEADLEY, T.; TANNER, C. C., (2012). “Constructed Wetlands with Floating Emergent Macrophytes: An Innovative Stormwater Treatment Technology”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42, pp. 2261-2310.

Irmay, S., 1958. “On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas”. *EOS* 39 (4), 702–707.

JAYAWEERA, M.W., KASTURIARACHCHI, J.C., (2004). “Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewaters by phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)”. *Wat. Sci. Techn.* 50 (6), 217–225.

JAYAWEERA, M.W., KASTURIARACHCHI, J.C., KULARATNE, R.K.A., WIJEYEKOON, S.L.J., (2008). “Contribution of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) grown under different nutrient conditions to Fe-removal mechanisms in constructed wetlands”. *J. Env. Manag.* 87 (3), 450–460.



LIU, C.; SHAN, Y.; LEI, J.; NEPF, H. (2019). “*Floating treatment islands in series along a channel: The impact of island spacing on the velocity field and estimated mass removal*”. Advances in Water Resources 119, pp. 22-231.

LUCKE, T.; WALKER, C.; BEECHAM, S. (2019). “*Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: A review*”. Science of the Total Environment 660, pp. 199-208.

NURUZZAMAN, M., ANWAR, A.H.M.F., SARUKKALIGE, R., SARKER, D.C., 2021. “*Review of hydraulics of floating treatment islands retrofitted in waterbodies receiving stormwater*”. Sci. Tot. Env. 801, 149526.

SCHWAMMBERGER, P.; LUCKE, T.; WALKER, C.; TRUEMAN, S. (2019). “*Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the construction phase of an urban residential development*”. Science of the Total Environment 677, pp. 390-403.

WANG, W.-H., WANG, Y.i., SUN, L.-Q., ZHENG, Y.-C., ZHAO, J.-C., (2020). “*Research and application status of ecological floating bed in eutrophic landscape water restoration*”. Sci. Tot. Env. 704.

XAVIER, M.; JANZEN, J.; NEPF, H. (2018). “*Numerical modeling study to compare the nutrient removal potential of different floating treatment island configurations in a stormwater pond*”. Ecological Engineering 111, pp. 78-84.

YAMASAKI, T.N., WALKER, C., JANZEN, J.G., NEPF, H. (2022). “*Flow distribution and mass removal in floating treatment wetlands arranged in series and spanning the channel width*”. Journal of Hydro-environment Research 44, 1–11.

YEH, N., YEH, P., CHANG, C., 2015. “*Artificial floating islands for environmental improvement*”. Ren. Sust. Ener. Rev. 47, 616–622.

b) Outros

FLUENT Inc. (2019). User’s Guide (release 19.5).

HEADLEY, T.; TANNER, C.C., (2006). “*Application of floating wetlands for enhanced stormwater treatment: a review*”. NIWA client report, Auckland Regional Council, New Zealand.