



IMPACTO DE UMA ABERTURA ENTRE *WETLANDS* FLUTUANTES DE TRATAMENTO NA MISTURA E REMOÇÃO TOTAL DE NUTRIENTES

Taís N. Yamasaki¹ & Johannes G. Janzen²

RESUMO – *Wetlands* flutuantes de tratamento (FTWs) são uma alternativa de solução baseada na natureza que utiliza vegetação aquática no tratamento de água, águas pluviais e efluentes. A pesquisa corrente em FTWs tem focado em aumentar a remoção de nutrientes e poluentes pelos FTWs. Uma estratégia é criar uma abertura entre FTWs para aumentar a mistura e a concentração de nutrientes chegando aos FTWs, proporcionando maior fornecimento de nutrientes a serem tratados. Este estudo utilizou a Fluidodinâmica Computacional para simular e comparar dois cenários em um canal: (1) um único FTW, e (2) dois FTWs com uma abertura entre eles. A posição inicial e final dos FTWs nos dois cenários não se alterou, de modo que a abertura substituiu parte do volume do FTW do cenário (1) para o cenário (2). Os resultados mostram que a abertura proporcionou maior fluxo e concentração de nutrientes de um FTW ao outro, quando comparados com um único FTW. No entanto, a abertura reduziu o volume total de FTWs no cenário (2) em relação ao cenário (1), de modo que o cenário (2) não removeu mais nutrientes do que o cenário (1). Assim, pode-se inferir que a abertura é tão importante quanto o volume de FTWs na remoção total de nutrientes.

ABSTRACT– Floating treatment wetlands (FTWs) are an alternative nature-based solution that uses aquatic vegetation for water, stormwater and wastewater treatment. Current research on FTWs has been focused on increasing removal of nutrients and pollutants by FTWs. One strategy is to create a gap between FTWs to increase mixing and nutrient concentration reaching the FTWs, providing more nutrient supply to be treated. This study used Computational Fluid Dynamics to simulate and compare two scenarios in a channel: (1) a single FTW, and (2) two FTWs with a gap between them. The initial and final positions of the FTWs in the two scenarios did not change, such that the gap replaced part of the FTW volume from scenario (1) to scenario (2). The results show that the gap provided higher flow and nutrient concentration from one FTW to the next, when compared to a single FTW. However, the gap reduced the total FTW volume in scenario (2), relative to scenario (1), such that scenario (2) did not remove more nutrients than scenario (1). Thus, it can be inferred that the gap is as important as the FTW volume for total nutrient removal.

Palavras-Chave – CFD, tratamento, *wetlands*

1 INTRODUÇÃO

Wetlands flutuantes de tratamento (FTWs) são uma solução baseada na natureza (*nature-based solution*) para o tratamento de água de rios, canais e lagoas, e têm se tornado uma alternativa de crescente aplicação em projetos de engenharia (Lucke *et al.*, 2019), como, por exemplo, no tratamento

1) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS. E-mail: taisnatsumi@gmail.com

2) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS. E-mail: johannes.janzen@ufms.br



de águas pluviais (Winston *et al.*, 2013), em lagoas próximas a construções residenciais (Schwammberger *et al.*, 2019) e em rios urbanizados (Fang *et al.*, 2016). Os FTWs são similares aos *wetlands* construídos convencionais no que tange ao uso de plantas para a remoção de nutrientes e contaminantes. Porém, nos FTWs, as plantas aquáticas crescem de forma hidropônica em plataformas flutuantes, abaixo das quais as raízes permanecem em contato com a coluna d'água, crescendo verticalmente para baixo e formando uma densa rede, e acima das quais o caule e as folhas crescem normalmente (Headley e Tanner, 2012). Isso permite que os FTWs sejam dispostos diretamente no corpo d'água de interesse para o tratamento.

Os FTWs purificam o escoamento através de processos físicos e bioquímicos realizados pelas raízes das plantas e pelo biofilme, este último constituído por algas, bactérias e microrganismos que se formam nas raízes (Lucke *et al.*, 2019). Os FTWs são capazes de remover nutrientes, metais e matéria orgânica dissolvida, reter sólidos suspensos e diminuir a turbidez da água (Headley e Tanner, 2012). Estudos laboratoriais indicaram o potencial dos FTWs na remoção de contaminantes persistentes, como pesticidas, herbicidas e produtos farmacêuticos (Bi *et al.*, 2019), o que, a nível ecossistêmico, seria benéfico na redução da biomagnificação em teias alimentares.

O design de FTWs, isto é, a forma como os FTWs são dispostos no corpo d'água, tem sido estudado a fim de aumentar a eficiência de tratamento dos FTWs (Xavier *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019, Yamasaki *et al.*, 2022). O presente estudo objetivou comparar dois cenários de design, em que um dos cenários foi formado por um único FTW e o outro cenário foi formado por dois FTWs separados por um comprimento de canal. A ideia foi que essa abertura permitiria a mistura vertical do escoamento entre os FTWs, o que aumentaria a concentração de nutrientes para o segundo FTW, aumentando assim a remoção total de nutrientes no sistema. Os cenários foram projetados e simulados em Fluidodinâmica Computacional (CFD).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo computacional possuiu geometria composta por um trecho de canal retangular e os FTWs. O canal possuiu comprimento $L_c = 160$ m, largura $W_c = 12$ m e profundidade $H_c = 2,3$ m. No cenário 1, o único FTW apresentou comprimento $L_1 = 100$ m, largura $W = W_c = 12$ m e profundidade $H = 1,15$ m (Figura 1). No cenário 2, uma abertura transversal de comprimento igual a $10H$ foi feita no meio do FTW inicial, dividindo-o em dois FTWs de comprimento $L_2 = 44,25$ m (Figura 2). Os FTWs foram postos a 30 m da entrada do canal. Os eixos cartesianos (x, y, z) se originaram no fundo

do canal, cujos respectivos componentes de velocidade foram (u, v, w) . Os cenários representaram sistemas de FTW em escala de campo (Yamasaki e Janzen, 2021a; Billore *et al.*, 2009), ao contrário de estudos anteriores (Yamasaki e Janzen, 2020a).

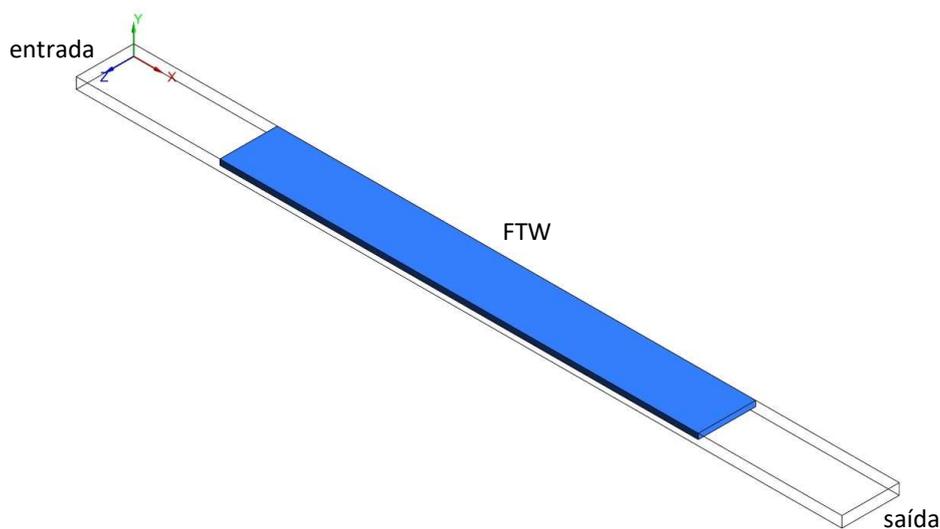


Figura 1 – Geometria do cenário 1. O FTW é indicado em azul.

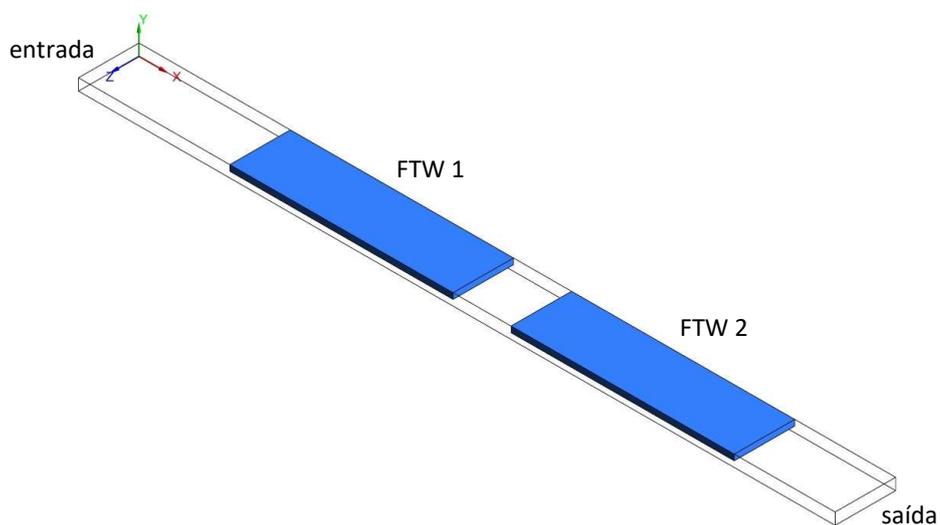


Figura 2 – Geometria do cenário 2. Os FTWs (em azul) estão separados por uma abertura de $10H$ de comprimento.

A geometria foi discretizada em uma malha composta por elementos de volume finito, nos quais as equações governantes de conservação de massa, quantidade de movimento e turbulência foram solucionadas com um erro de convergência de 10^{-6} . O tamanho dos elementos hexaédricos da malha



foi de 0,4 m fora dos FTWs e de 0,2 m no interior dos FTWs. No cenário 1, a malha apresentou 500760 elementos. No cenário 2, a malha apresentou 445920 elementos.

As seguintes condições de contorno foram utilizadas nas simulações. A entrada do canal foi definida como *velocity-inlet*, com velocidade inicial e uniforme de $U_0 = 0,01$ m/s. As paredes e o fundo do canal foram tratados como paredes não-deslizantes. O topo do canal e do FTW foi definido como simetria. A saída do canal foi representada como *pressure-outlet*, com pressão nula. As simulações foram realizadas no *solver* FLUENT® v.19.5, utilizando-se as equações *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) e o modelo de turbulência *Transition Shear Stress Transport* (SST).

Os FTWs foram modelados como meio poroso, no qual um termo sumidouro de quantidade de movimento (S_i) foi atribuído às células correspondentes aos FTWs. O S_i foi computado como a resistência do FTW ao escoamento, conforme a equação de Darcy-Forchheimer:

$$S_i = -\left(\frac{1}{\alpha}\mu u_i + C_2 \frac{1}{2}\rho |u|u_i\right) \quad (1)$$

onde $1/\alpha$ é o coeficiente de resistência viscosa, μ é a viscosidade dinâmica, u_i é o componente da velocidade e C_2 é o coeficiente de resistência inercial. A resistência dos FTWs foi de $1/\alpha = 707,075$ m⁻² e $C_2 = 7,318$ m⁻¹ nas direções x e z , e de $1/\alpha = 3,655$ m⁻² e $C_2 = 0,61$ m⁻¹ na direção y , baseada no modelo de FTW de Liu *et al.* (2019). O meio poroso é uma boa alternativa para rodar a simulação mais rapidamente, uma vez que as raízes do FTW não precisam ser delineadas na etapa de criação da geometria (Yamasaki *et al.*, 2022; Yamasaki e Janzen, 2020b; Xavier *et al.*, 2018). Essa estratégia deriva de estudos desenvolvidos com vegetação aquática emergente (Yamasaki *et al.*, 2021b; Yamasaki *et al.*, 2019), após se verificar que o meio poroso é capaz de capturar os fenômenos hidrodinâmicos formados na interação escoamento-vegetação, e considerando que a representação individual dos caules que compõem a vegetação torna a malha mais complexa (Yamasaki e Janzen, 2021c; Yamasaki *et al.*, 2018; De Lima *et al.*, 2015).

A remoção de massa pelos FTWs foi representada pelo decaimento de primeira ordem:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (2)$$

onde C é a concentração de nutrientes e $k = 0,0012$ s⁻¹ é a constante de taxa de decaimento, cujo valor foi obtido a partir de estudos de mesocosmo com FTWs (Xavier *et al.*, 2018). Para representar os

nutrientes a serem removidos pelos FTWs, um traçador conservativo de concentração inicial C_0 foi inserido de forma constante e uniforme na entrada do canal, após a simulação permanente do escoamento convergir. A simulação foi finalizada quando a concentração do traçador na saída do canal (C_{out}) se tornou constante. A remoção total de cada cenário foi então calculada:

$$Remoção\ total = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_0}\right) * 100\% \quad (3)$$

3 RESULTADOS

A Figura 3 apresenta a evolução da velocidade total do escoamento (U) no plano longitudinal-vertical (x - y), a meia largura do canal ($z = W_c/2$). É possível visualizar que o escoamento foi estratificado em duas camadas de velocidade distintas. Dentro dos FTWs ($H_c - H \leq z \leq H_c$), U/U_0 foi reduzido a valores entre zero e 0,471, ou seja, a até aproximadamente metade de U_0 . Abaixo dos FTWs ($0 \leq z < H_c - H$), U/U_0 foi acelerado a valores entre 1,650 a 2,356. O aumento de U/U_0 da camada de FTWs para a camada abaixo dos FTWs, considerando os limites superiores dos intervalos ($U/U_0 = 0,471$ e 2,356), foi de 500%, o que pode ser considerado um aumento expressivo. Como $H = H_c/2$, a camada de FTWs e a camada abaixo dos FTWs têm igual seção transversal, então a vazão segue o resultado da variação de U/U_0 , isto é, aumento de 500% de vazão abaixo dos FTWs.

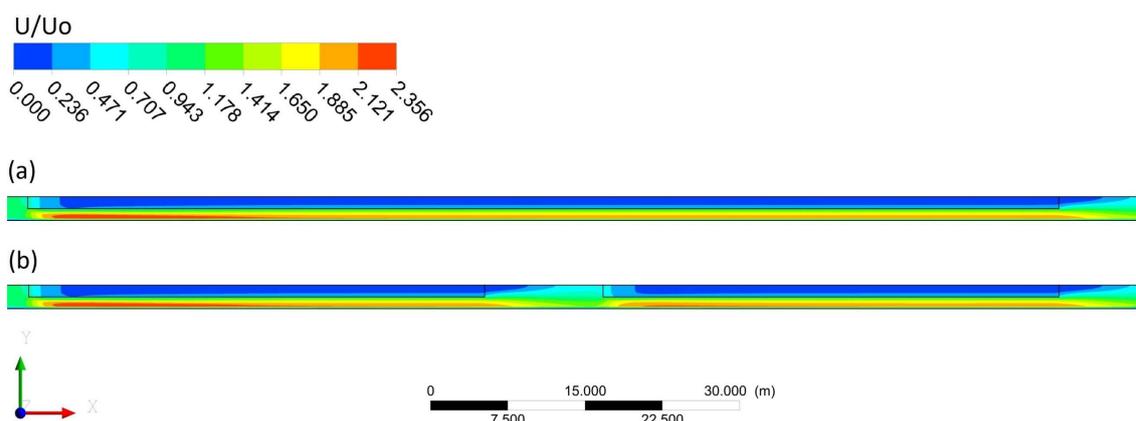


Figura 3 – campo de velocidade total normalizada pela velocidade de entrada no sistema, U/U_0 , obtido a meia largura do canal ($z = W_c/2$). Em (a), cenário 1. Em (b), cenário 2. O escoamento vai da esquerda para a direita.

No cenário 1, a estratificação de U/U_0 persistiu por todo o comprimento do FTW (Figura 3a). No cenário 2, o gradiente de U/U_0 foi reduzido na região de abertura entre os dois FTWs (Figura 3b), indicando que a abertura promoveu a mistura do escoamento vindo de baixo do 1º FTW com o escoamento saindo do 1º FTW. A mistura pode ser verificada comparando-se o gráfico de

concentração obtido na camada dos FTWs e abaixo dos FTWs (Figura 4). No cenário 1 (Figura 4a), C/C_0 não apresenta nenhum indício de mistura entre as camadas, que seguiram uma contínua redução devido à remoção pelos FTWs (curva laranja) e à troca de massa vertical devido à turbulência na interface entre as camadas (curva azul). No cenário 2 (Figura 4b), a concentração aumentou de $C/C_0 = 0,146$ para $0,322$ entre o fim do 1º FTW ($x-30 = 44$ m, curva laranja) e o início do 2º FTW ($x-30 = 56$ m, curva verde), o que corresponde ao aumento de 121%. Note que C/C_0 no início do 2º FTW ficou próximo de C/C_0 abaixo do FTW, na posição $x-30 = 56$ m (compare as curvas verde e azul), o que indica que de fato a mistura ocorrida na abertura foi transmitida ao 2º FTW.

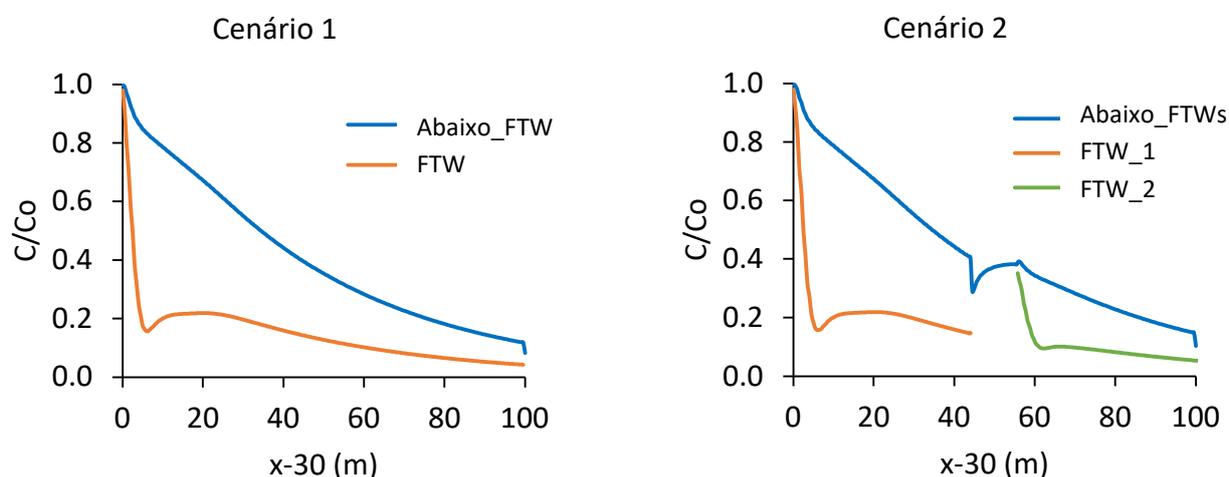


Figura 4 – Concentração de traçador normalizada pela concentração inicial (C/C_0), obtida como a média nos planos verticais-transversais ($y-z$), ao longo do comprimento dos FTWs. A entrada dos FTWs se encontra em $x-30 = 0$, e o fim dos FTWs se encontra em $x-30 = 100$ m.

A remoção total de massa do cenário 1 foi de 88,66%, e a remoção total de massa do cenário 2 foi de 85,79% (Figura 4). A diferença de remoção total entre os dois cenários foi de 3,24%, ou seja, não houve uma variação expressiva ao se criar a abertura no cenário 2. Embora a abertura tenha melhorado a mistura de traçador e aumentado a concentração C/C_0 entrando no 2º FTW, houve uma perda de volume de FTW igual a $10H*W*H = 158,7$ m³ do cenário 1 para o cenário 2, isto é, o volume de reação de decaimento foi reduzido em 11,5% no cenário 2. Logo, a inserção da abertura, que auxilia na remoção, foi contrabalanceada pela perda de volume relativo, de modo que a remoção total não aumentou do cenário 1 para o cenário 2. Isso demonstra que tanto o volume relativo quanto a abertura são fatores importantes para a remoção total de massa no sistema. A partir disso, uma



alternativa de maior remoção potencial do que os cenários 1 e 2 seria a combinação do cenário 1 (alto volume reativo) com o cenário 2 (aberturas para aumentar a concentração chegando nos FTWs).

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou se a inserção de uma abertura em um FTW, separando-o em dois FTWs, aumentaria a mistura de nutrientes e a remoção total de massa pelos FTWs. Através de simulações em CFD, constatou-se que a abertura de comprimento igual a 10 vezes o tamanho das raízes melhorou a mistura entre os FTWs, aumentando em 121% a concentração entre o fim do 1º FTW e o início do 2º FTW. Porém, a abertura reduziu o volume reativo em 11,5% entre os cenários 1 e 2, o que comprometeu um possível aumento de remoção total de nutrientes pelo aumento da mistura entre os FTWs. Os cenários 1 e 2 removeram uma fração similar de traçador.

AGRADECIMENTOS

Taís N. Yamasaki recebeu a bolsa nº 88882.458516/2019-01 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) no decurso deste estudo. A autora também agradece a Chris Walker e Heidi Nepf pela discussão dos resultados.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BILLORE, S.K., PRASHANT, SHARMA, J.K. (2009). “Treatment performance of artificial floating reed beds in an experimental mesocosm to improve the water quality of river Kshipra”. *Water Science and Technology* 60(11), pp. 2851-2859.
- DE LIMA, PHS.; JANZEN, J.G.; NEPF, H. (2015). “Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth”. *Environmental Fluid Mechanics* 15(4), pp. 881-898.
- FANG, T.; BAO, S.; SIMA, X.; JIANG, H.; ZHU, W.; TANG, W. (2016). “Study on the application of integrated eco-engineering in purifying eutrophic river waters”. *Ecological Engineering* 94, pp. 320-328.
- HEADLEY, T.; TANNER, C. (2012). “Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: An innovative stormwater treatment technology”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42, pp. 2261-2310.
- 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* 129, pp. 222-231.



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.

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.

WINSTON, R.; HUNT, W.; KENNEDY, S.; MERRIMAN, L.; CHANDLER, J.; BROWN, D. (2013). “*Evaluation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds*”. Ecological Engineering 54, pp. 254-265.

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.; CANNATA, G.; GALLERANO, F.; BARSÌ, L.; JANZEN, J.G. (2018). “*Effects of a 3-D, aquatic vegetation patch on the flow: A numerical approach*”. WSEAS Transactions on Environment and Development 14, pp. 590-598.

YAMASAKI, T.; DE LIMA, P.; SILVA, D.; PREZA, C.; JANZEN, J.; NEPF, H. (2019). “*From patch to channel scale: The evolution of emergent vegetation in a channel*”. Advances in Water Resources 129, pp. 131-145.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2020a). “*Estimativa do tempo de residência em wetlands flutuantes de tratamento*” in Anais do XIII ENAU - Encontro Nacional de Águas Urbanas e III SRRU - Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Out. 2020.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2020b). “*Estimating the resistance of a porous media that numerically represents a floating treatment wetland*” in Anais do 1st IAHR Young Professionals Congress, Nov. 2020, pp. 199-200.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2021a). “*Effects of three floating treatment wetland arrangements on the flow field of a channel*” in Anais do EGU General Assembly 2021, Abr. 2021.

YAMASAKI, T.N.; LIMA, P.H.S.; XAVIER, M.L.M.; JANZEN, J.G. (2021b). “*Modelagem da vegetação aquática em estudos de dinâmica dos fluidos computacional*”. Engenharia Sanitária e Ambiental 26, pp. 97-104.

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G. (2021c). “*Validação de um modelo computacional representando uma mancha de vegetação aquática*”. Revista Hidrolatinoamericana 5, pp. 20-22.

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, pp. 1-11.