

II-285 - AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE WETLANDS CONSTRUÍDAS MODIFICADAS USANDO CFD

Emily Elizabeth Rengers⁽¹⁾

Engenheira Civil pela West Virginia University. Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Jhonatan Barbosa da Silva⁽²⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mestre em Tecnologias Ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Doutorando em Tecnologias Ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Paula Loureiro Paulo⁽³⁾

Engenheira Química pela Universidade Estadual de Maringá. Doutora em Ciências Ambientais pela Wageningen University and Research Centrum. Pós-Doutora em Tecnologias Ambientais pela Wageningen University and Research Centrum. Professora Adjunta II da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Johannes Gérson Janzen⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Pós-Doutor em Mecânica dos Fluidos Ambientais pela Massachusetts Institute of Technology. Professor Adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PGTA) – Campus Universitário – Campo Grande - MS - CEP: 79070-900 - Brasil - Tel: +55 (67) 3345-7392 - e-mail: emilyrengers1@gmail.com.

RESUMO

A fim de beneficiar o projeto de engenharia de *wetlands* construídos e uma maior utilização de CFD para simular os processos de transporte que ocorrem dentro de *wetlands*, este trabalho utilizou fluidodinâmica computacional (CFD) tridimensional para calcular o campo de velocidade e a distribuição do tempo de residência (RTD) para um *wetland* construído de fluxo horizontal subsuperficial modificado chamado de câmara de evapotranspiração (CEvap). Duas configurações CEvap diferentes foram avaliadas, sendo modificado o formato da câmara anaeróbica (AnC), um “tubo” existente ao longo da parte inferior da CEvap com capacidade de digerir a matéria orgânica e reter o material grosseiro. As curvas de RTD foram comparadas quantitativamente usando índices hidráulicos de curto-circuito, de mistura, e de momento. Os parâmetros hidráulicos foram relacionados com a eficiência do tratamento de *wetlands*.

PALAVRAS-CHAVE: *Wetland* construído, fluidodinâmica, modelagem computacional, teste com traçadores, desempenho hidráulica.

INTRODUÇÃO

Wetlands construído de fluxo horizontal subsuperficial podem ser utilizadas para tratamento e reutilização de água cinza domiciliar (Silva et al., 2014). Elas removem os poluentes através de processos que dependem do tempo, incluindo a sedimentação, a absorção pelas plantas, e reduções químicas ou biológicas (Kadlec e Wallace, 2009; Konnerup et al., 2009; Vymazal e Kröpfelová, 2009; Paulo et al., 2009; Haberl et al., 2003). Quanto mais tempo os poluentes permanecem no interior do sistema, maior é a quantidade de poluentes removidos. É importante projetar uma *wetland* de tal forma que possua regime de escoamento pistonado, porque ele conduz a um maior tempo de residência para todas as parcelas de água que adentram o sistema e, consequentemente, maximizando a redução do poluente. Considerando um regime de escoamento do tipo fluxo de pistão, cada parcela da água que entra no sistema alcança a saída em um tempo nominal, τ , igual a:

$$\tau = V/Q \quad (1)$$

onde V representa o volume do líquido no sistema e Q é a vazão volumétrica através do sistema. O tempo nominal τ é o tempo requerido para uma troca completa do volume dentro de um *wetland* (Persson et al., 1999;

Kadlec e Knight, 1996). Na prática, é impossível obter o fluxo pistonado. Cada parcela da água possui um tempo de residência diferente influenciado pelas propriedades físicas (e.g. a densidade da água), de escoamento (e.g. vazão) e geométricas (e.g. comprimento do *wetland*) de um *wetland*. Isto é atribuído ao complexo comportamento hidrodinâmico existente no interior de *wetlands*, principalmente os curtos circuitos, as regiões de mistura e as zonas mortas ou de recirculação. Consequentemente, o cálculo da distribuição do tempo de residência (RTD) para cada parcela da água é importante, porque ele é usado para projetar as eficiências hidráulicas e de qualidade da água dos sistemas tipo *wetland*. As características do escoamento podem ser obtidas através do emprego da ferramenta *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD é uma ferramenta computacional utilizada para resolver as equações de conservação de massa, calor e quantidade de movimento utilizando técnicas numéricas, permitindo o estudo combinado das diversas variáveis que influenciam o comportamento hidrodinâmico de *wetlands*.

Neste estudo, é empregada a ferramenta CFD para avaliar o comportamento hidrodinâmico de duas configurações de *wetlands* subsuperficiais construídos horizontais. Os campos de velocidade, as RTDs e os índices hidráulicos obtidos a partir das RTDs (curto circuito, mistura, e índice de momento) são utilizados para avaliar as eficiências hidráulica e de qualidade da água das duas configurações.

MATERIAIS E METODOS

EFICIÊNCIA HIDRÁULICA

Para caracterizar o desempenho de um *wetland*, comumente a RTD é reduzida a um único número que representa a eficiência hidráulica. A eficiência hidráulica descreve o desempenho hidráulico em termos da “distância” do escoamento real do escoamento ideal “fluxo de pistão” (Thackston et al., 1987). Um indicador da eficiência hidráulica deveria quantificar o curto-circuito, a mistura, ou uma combinação de ambos, existente no interior do *wetland* (Persson et al., 1999). A medição da eficiência hidráulica é um método simples e eficaz de caracterizar os *wetlands*, identificando fatores que afetam o desempenho do tratamento de *wetlands*.

No presente trabalho, quatro indicadores foram calculados, os quais podem ser agrupados em três categorias gerais de indicadores (curto-circuito, de mistura, de momento): (1) como indicador de curto-circuito foi utilizado $\theta_{10} = t_{10}/\tau$, onde t_{10} é o tempo necessário para que 10% do traçador saia da *wetland*. Em um fluxo de pistão ideal essa razão é 1; ela se aproxima de zero conforme a mistura aumenta; (2) os indicadores de mistura: o índice de dispersão adimensional, M_2 , e o índice de dispersão de Morril, $MDI = t_{90}/t_{10}$, onde t_{90} e t_{10} são os tempos necessários para 90% e 10% do traçador sair do *wetland*, respectivamente. Os valores de MDI para fluxo de pistão é 1 e para uma *wetland* de mistura completa é de aproximadamente 22 (Metcalf e Eddy, 2003). Para fluxo de pistão, $M_2 = 0$ (Wahl et al, 2010.); (3) Índice de momento:

$$MI = 1 - \int_0^1 (1 - \theta) C'(\theta) d\theta \quad \text{equação (1)}$$

onde $\theta = t/\tau$, é o tempo adimensional; e $C'(\theta)$ é a concentração do traçador adimensional. O índice de momento, apresentado por Wahl et al. (2010), considera que os tempos de residência de um *wetland* completamente eficiente irão ser iguais ou exceder o tempo nominal de residência. A porção de traçador que sai da *wetland* antes do tempo de residência nominal impacta negativamente a eficiência hidráulica. O segmento da função RTD anterior ao tempo de residência nominal é considerado ineficiente, com mais peso sendo atribuído para os tempos de residência mais prematuros. Se a maior parte do traçador que sai da *wetland* possui proximidade com o tempo de residência nominal, a eficiência hidráulica é alta. Quanto mais cedo o traçador sai do sistema, a eficiência hidráulica se aproxima de zero.

Os índices escolhidos para as categorias (1) e (2) foram sugeridos por Teixeira e Siqueira (2008), após avaliar diferentes índices de curto-circuito e de mistura, baseado em três critérios: a correlação do índice com o fenômeno físico que ele representa, a capacidade do índice de detectar variabilidade e a variabilidade estatística do índice. O índice de momento supera muitas das fraquezas inerentes aos índices de curto-circuito e de mistura existentes. Além disso, o índice de momento parece ser um bom preditor do tratamento (Wahl et al., 2010).

Para as reações de primeira ordem, é possível determinar a fração de poluente (X) que sai da *wetland* através da equação (Wahl et al., 2010):

$$X = \int_0^{\infty} E(t) e^{-kt} dt \quad \text{equação (2)}$$

onde k é a constante de decaimento. Considerando-se $k = 1,8 \text{ dia}^{-1}$ (Metcalf e Eddy, 2003; Stein et al., 2006), X pode ser determinado.

CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Para este estudo, um código CFD foi empregado para resolver numericamente as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento para cada volume de controle. Os cálculos foram realizados utilizando o software ANSYS CFX®. A discussão a seguir apresenta as etapas gerais necessárias para configurar uma simulação CFX®. Mais detalhes sobre as equações governante e os algoritmos podem ser encontrados no manual do utilizador CFX® (ANSYS Inc., 2012).

GEOMETRIA

A Figura 1 mostra a geometria da CEvap com AnC triangular e AnC semi-circular. As dimensões da CEvap são: 1 m de largura x 1 m de altura x 1 m de comprimento. A declividade é de 1,15 graus e os tubos de entrada e de saída possuem um diâmetro de 50 mm. Há um tubo triangular (com base de 0,5 m e altura de 0,87 m) ou circular (com raio de 0,25 m) ao longo do fundo da CEvap, denominado de Câmara Anaeróbica (AnC). Ela possui capacidade de digerir matéria orgânica e reter material. A água cinza sai da AnC através de orifícios, passa através de uma camada de brita ($D_{60} = 14 \text{ mm}$) e sai através de um tubo de 50 mm. A fração de vazios da brita (ϵ), definida como a relação entre o volume de vazios e o volume do sistema com brita é de 0,43.

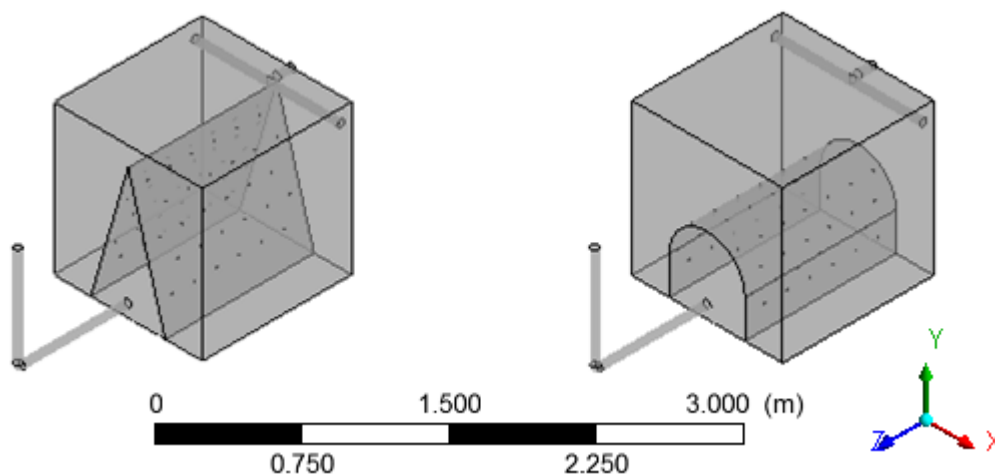


Figura 1: Geometria do CEvap com o AnC triangular (a) e o AnC semi-circular (b).

MALHA

As malhas foram não estruturadas com cerca de 1.900.000 elementos. Os elementos possuem tamanho mínimo de 0,003 m e máximo de 0,0125 m. O tamanho máximo da face é de 0,0115 m. As malhas são mais refinadas nas regiões onde o gradiente de velocidade é maior (perto da parede e os orifícios) e mais grosseiras nas regiões de baixo gradiente de velocidade.

EQUAÇÕES GOVERNANTES E CONDIÇÕES DE CONTORNO

As equações que governam os processos de transporte no interior da *wetland* são as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento. As equações foram resolvidas em duas etapas. Na primeira etapa, o escoamento foi calculado considerando regime permanente e laminar. Na entrada, foi imposta uma vazão mássica uniforme de 0,1167 kg/s. Na saída, foi especificada uma pressão de referência estática média de 0 Pa. A condição de não deslizamento foi aplicada nas paredes e a condição de deslizamento foi aplicada na superfície da água. Uma porosidade de 0,43 e um diâmetro médio de brita de 14 milímetros foi utilizado para o meio poroso. Na segunda etapa, foi realizado um teste de traçador visando a obtenção da RTD da *wetland*. Para isso foi calculada a equação de conservação de massa da concentração de um escalar utilizando o resultado do campo de escoamento obtido na primeira etapa. Nessa etapa, um traçador foi introduzido de forma “instantânea” na *wetland* e a sua concentração foi monitorada na seção de saída. O tempo de injeção foi de 36 s e a massa do traçador injetado foi igual a $M = 5850$ mg. A simulação foi realizada até que mais que 90% do traçador fosse recuperado na saída.

RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 2 apresenta os vetores de velocidade bem como a magnitude da velocidade para as diferentes configurações do CEvap. Pode ser visto que o jato de entrada atravessa a parte inferior do AnC com alta velocidade em ambas configurações. Zonas complexas de recirculação ocorrem após o jato atingir a parede do AnC. Na parede, parte da energia do jato é dissipada. Uma vez no meio poroso, as velocidades são mais baixas e os vetores de velocidade movem-se em direção à saída.

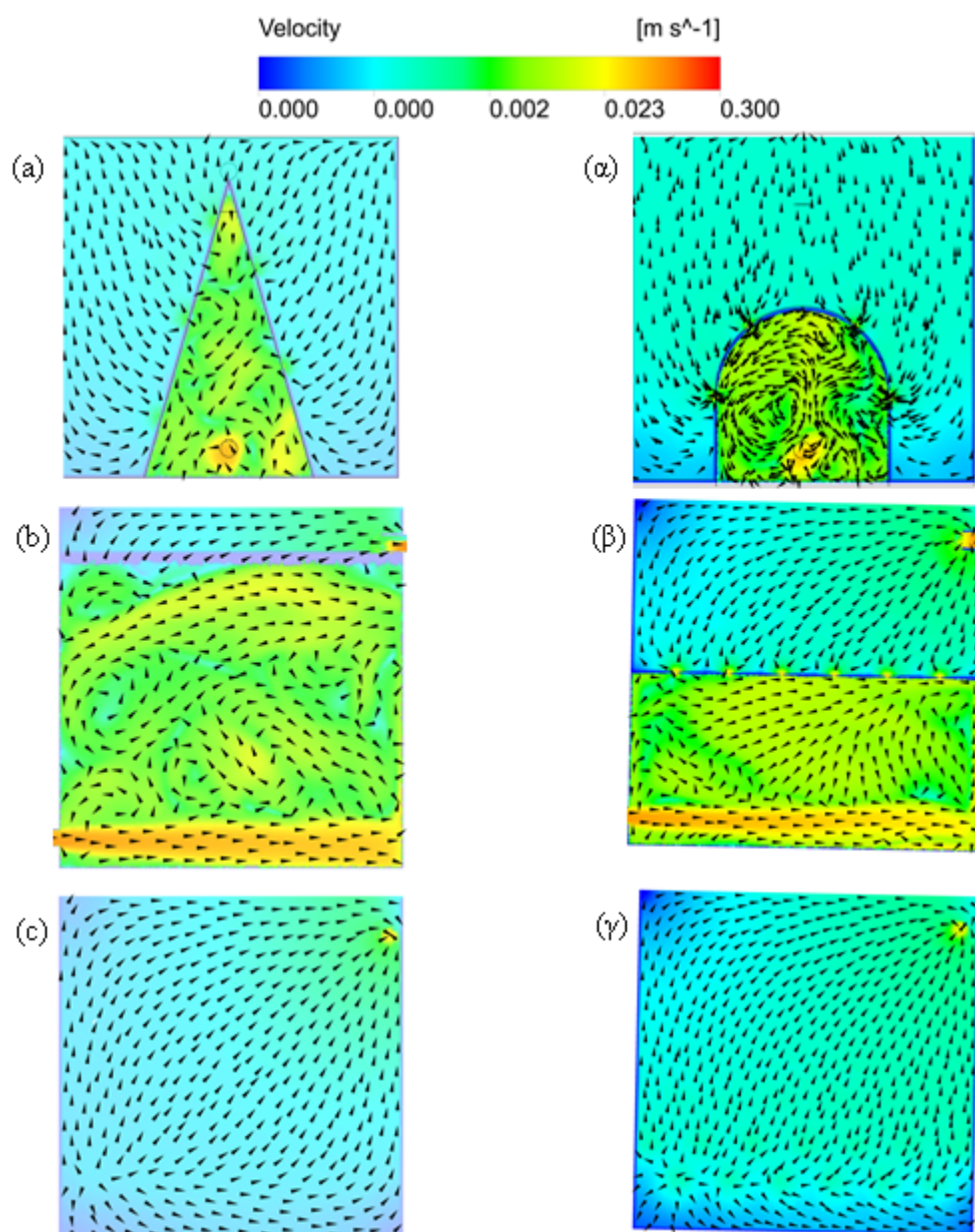


Figura 2: Cortes transversais (a e b), longitudinais ao longo da entrada (c e d), longitudinais deslocados de 30 cm do plano de entrada (e e f) apresentando vetores velocidade e a magnitude da velocidade. A coluna da direita apresenta os resultados para CEvap semi-circular, enquanto que a coluna da esquerda apresenta os resultados para CEvap triangular.

A fim de melhorar a nossa compreensão da hidrodinâmica da *wetland* discutido acima, índices hidráulicos foram calculados para aferir as CEvaps com configurações de AnC diferentes (Tabela 1).

Tabela 1: Índices hidráulicos calculados a partir das curvas de RTD dos CEvaps.

CEvap	θ_{10}	M_2	MDI	MI	X
Triangular	0.25	0.56	7.91	0.72	0.91
Semi-circular	0.32	0.42	5.80	0.75	0.91

Pode-se notar que θ_{10} aumenta quando a configuração de AnC é semi-circular, indicando presença de curto-circuito não tão intenso. No caso da mistura, os índices de mistura, M_2 e MDI , são mais baixos quando a configuração AnC é semi-circular, o que demonstra menor dispersão. Os valores de MI aumentam de 0,72 para

0,75 quando a configuração da AnC é mudada de triangular para semi-circular. Isso significa que a configuração semi-circular possui eficiência hidráulica. O valor de X não se alterou com a mudança no formato da AnC, o que significa que a configuração da AnC não tem um impacto no tratamento de água. Isso significa que os índices de eficiência de tratamento não estão relacionados aos índices de eficiência hidráulica.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Um modelo de CFD foi utilizado para calcular o campo de velocidade para duas configurações da câmara de evapotranspiração (CEvap). Os resultados mostraram que a eficiência hidráulica da CEvap com AnC semi-circular é superior ao com AnC triangular. No entanto, a fração de poluente que permanece ao longo do tempo não se alterou com a mudança no formato da AnC, indicando que ela não interferirá no tratamento da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANSYS Inc., CFX-Pre Users Guide Release 14.5, 2012.
2. HABERL R., GREGO, S., LANGERGRABER, G., KADLEC, R.H., CICALINI, A.R., DIAS, S.M., NAVAIS, J.M., SUBERT, S., GERTH, A., THOMAS, H., HEBNER, A. Constructed wetlands for the treatment of organic pollutants. *Journal of Soils and Sediments*, v.3, n.2, p.109–124, 2003.
3. KADLEC, R.H.; KNIGHT, R.L. *Treatment Wetlands*. CRC Press, Boca Raton, FL, p.893, 1996.
4. KADLEC, R.H., WALLACE, S.D. *Treatment Wetlands*, second ed. New York, New York, 2009.
5. KONNERUP, D., KOOTTATEP, T., BRIX, H. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. *Ecological Engineering*, v.35, p.248-257, 2009.
6. Metcalf, Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th ed. Mc Graw Hill, New York, 2003.
7. PAULO, P.L., BEGOSSO, L., PANSONATO, N., SHRESTHA, R.R., BONCZ, M.A. Design and configuration criteria for wetland systems treating greywater. *Water Science and Technology*. v.60, n.8, p.2001-2007, 2009.
8. PERSSON, J., SOMES, N., WONG, T. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, v.40, n.3, p.291–300, 1999.
9. SILVA, J.B., MAGALHÃES FILHO, F.J.C., MENEZES, C.S., PAULO, P.L. Hidrodinâmica no Desenvolvimento de Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Cinza. 4 workshop – rede de pesquisa: Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social. Org: Silva, G.F., Leite, N.A. Editora da Universidade Federal de Sergipe cap. 9, p.203-220, 2014.
10. STEIN, O.R., BIEDERMAN, J.A., HOOK, P.B., ALLEN, W.C. Plant species and temperature effects on the $K-C^*$ first-order model for COD removal in batch-loaded SSF wetlands. *Ecological Engineering*, v.26, p.100–112, 2006.
11. TEIXEIRA, E.C., SIQUEIRA, R.N. Performance assessment of hydraulic efficiency indexes. *J. Environmental Engineering*, v.134, p.851–859, 2008.
12. THACKSTON, E.L., SHIELDS, F.D., SCHOROEDER, P.R. Residence time distributions of shallow basins. *Journal of Environmental Engineering*, v.113, n.2, p.219-223, 1987.
13. VYMAZAL, J., KRÖPFELOVÁ, L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience. *Science of the Total Environment*, v.407, p.3911-3922, 2014.
14. WHAL, M.D., BROWN, L.C., SOBOYEJO, A.O., MARTIN, J., DONG, B. Quantifying the hydraulic performance of treatment wetlands using the moment index. *Ecological Engineering*, v.36, p.1691-1699, 2010.