

USO DE TRAÇADOR SALINO PARA AVALIAÇÃO DA COLMATAÇÃO E DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1137-1148/2015>

MATEUS P. DE MATOS¹, MARCOS V. SPERLING², ANTONIO T. MATOS³,
RICARDO G. PASSOS⁴

RESUMO: A colmatação é um fenômeno intrínseco aos sistemas alagados construídos (SACs) utilizados no tratamento de esgotos, sendo decorrente dos mecanismos de remoção de poluentes. Dentre os métodos disponíveis para a avaliação da colmatação, destaca-se o uso de traçadores para a obtenção das condições hidrodinâmicas dos SACs. No entanto, não há um traçador ideal; os salinos, por exemplo, são passíveis de absorção, mecanismo influenciado pelo estágio no qual a planta se apresenta. Assim, objetivou-se, com a realização do trabalho, avaliar a utilização do NaCl para caracterização do grau de colmatação e das condições hidrodinâmicas de SACs de escoamento horizontal subsuperficial, plantado e não plantado, verificar a confiabilidade do uso desse traçador em testes executados durante o estágio de crescimento (após o corte da parte aérea) e o florescimento da taboa (*Typha latifolia*), além da suscetibilidade de causar danos às plantas. Os resultados indicaram que o NaCl pode ser utilizado para estudos de comparação do grau de colmatação de SACs, inclusive não apresentando danos à taboa. Verificou-se que, após sete anos de operação, a unidade plantada encontra-se mais colmatada e com regime de escoamento mais turbulento. Também foi possível inferir que o corte das plantas propiciou aumento na dispersão no sistema.

PALAVRAS-CHAVE: cloreto de sódio; eficiência volumétrica; esgotos; obstrução; plantas; wetlands construídos.

SALINE TRACER USE FOR CLOGGING AND HYDRODYNAMIC EVALUATIONS IN HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS

ABSTRACT: Clogging is an intrinsic phenomenon of constructed wetland systems (CWs) used in sewage treatment, and resulting from pollutant removal mechanisms. Among clogging evaluation methods, tracers may be highlighted since they can be used to determine CW hydrodynamic conditions. However, there is no ideal tracer; saline ones, for example, are able to be absorbed, which is influenced by plant stage. Thus, this study aimed to assess the use of NaCl to characterize the clogging degree and hydrodynamic conditions in subsurface horizontal flow constructed wetland, with or without cropping, as well as check this tracer reliability under tests during southern cattail (*Typha latifolia*) growth stage (after shoot cutting) and flourishing, as well as its ability to damage the plants. The results showed that NaCl could be used for studies comparing the degree of clogging of CWs, aside from presenting no damage to cattail. It was found that after seven years operating, cropped area is further clogged and has more turbulent flow. It was also possible to infer that plant cuttings led to increased dispersion within the system.

KEYWORDS: sodium chloride; volumetric efficiency; sewage; clogging; plants; constructed wetlands.

¹ Eng^o. Agrícola e Ambiental, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia, UFLA/Lavras - MG, Fone: (35)38294515, mateus.matos@deg.ufla.br

² Eng^o. Civil, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG/Belo Horizonte - MG, marcos@desa.ufmg.br

³ Eng^o. Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG/Belo Horizonte - MG, atmatos@desa.ufmg.br

⁴ Eng^o. Ambiental, Doutorando em Saneamento, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG/Belo Horizonte - MG, ricardogpassos@yahoo.com.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 24-11-2014

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 28-4-2015

INTRODUÇÃO

A colmatção é um fenômeno intrínseco ao funcionamento dos sistemas alagados construídos (SACs) ou *wetlands* construídos, nos quais há remoções por princípios físicos, como filtração, adsorção e sedimentação; químicos, dada a precipitação de poluentes; e biológicos, que ocorrem graças à degradação proporcionada pela comunidade microbiana organizada em biofilme, fenômenos que proporcionam acúmulo de sólidos no meio poroso (KADLEC & WALLACE, 2009; NIVALA & ROUSSEAU, 2009). O processo avançado desse fenômeno de obstrução dos poros pode levar ao indesejado escoamento superficial, implicando em colapso e perda de eficiência do sistema (KNOWLES et al., 2011; FU et al., 2013).

Em SACs plantados, além dos mecanismos de acúmulo de sólidos, anteriormente descritos, há ainda a contribuição de sólidos vegetais, oriundos da senescência vegetal, além da ocupação do espaço intersticial pelo crescimento das raízes (KADLEC & WALLACE, 2009; PEDESCOLL et al., 2011). Para autores como PEDESCOLL et al. (2011) e PAOLI & VON SPERLING (2013a), a presença das plantas contribui para redução da porosidade e condutividade hidráulica nos SACs. Por outro lado, BRIX (1997), BRASIL & MATOS (2008) e HUA et al. (2014) contra-argumentam que, na verdade, as raízes favorecem o escoamento no leito, em decorrência do "empolamento" que o crescimento das raízes proporciona ao meio suporte. Dessa forma, a porosidade drenável ou efetiva, que são os poros interligados por onde a água residuária escoar, passa a ser maior do que nas unidades sem vegetação.

Para que a colmatção possa ser minimizada e seja possível a adequada operação e manutenção do sistema, torna-se importante o conhecimento dos fatores que levam à sua ocorrência e à identificação do grau de obstrução em que se encontra o meio poroso. Existem descritas, na literatura, algumas metodologias que possibilitam ter uma noção do estágio de colmatção do meio poroso, dentre elas as que utilizam traçadores, por meio das quais a concentração da substância ao longo do tempo é monitorada, obtendo-se o tempo de detenção hidráulica (*TDH*) no sistema. Em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS), quanto menor o *TDH*, afastando-se do valor estabelecido no projeto, mais avançado é o grau de colmatção. Nesse caso, a expectativa é a de que existam caminhos preferenciais, zonas mortas e possível escoamento superficial no leito dos SACs. Além do *TDH*, também é possível avaliar as condições hidrodinâmicas, que podem dar indícios desses distúrbios e do regime de escoamento no sistema (METCALF & EDDY, 2003; KADLEC & WALLACE, 2009; BODIN et al., 2013).

Um inconveniente no uso de traçadores é que não existe uma substância ideal, que atenda aos critérios de apresentar características semelhantes ao fluido e não cause alterações no meio e que, ao mesmo tempo, apresente fácil detecção, mesmo quando em baixas concentrações. O traçador também deve ser não reativo e passível de ser injetado em curto período de tempo (METCALF & EDDY, 2003; BORGES, et al., 2009; SILVA et al., 2009). O cloreto de sódio, por exemplo, é de fácil aquisição, baixo custo e de fácil detecção (COTA et al., 2011); no entanto, apresenta características que o tornam não ideal, como ser passível de absorção; suas soluções não apresentarem massa específica semelhante à do líquido em tratamento, o que pode ocasionar fluxo preferencialmente vertical do sal, especialmente quando utilizadas soluções mais concentradas (LANGE et al., 2011). Como sua concentração é relativamente alta no esgoto sanitário bruto, cerca de 150 mg L⁻¹ de NaCl (PRATA et al., 2013), torna-se necessária a utilização de soluções traçadoras com maiores concentrações desse sal, o que pode concorrer para o aumento no tempo de permanência do traçador e a salinização do sistema (COTA et al., 2011). Além disso, a sazonalidade e o estágio de crescimento das espécies vegetais cultivadas nos SACs também podem influenciar na resposta do traçador (CHAZARENC et al., 2003; VERA et al., 2010; HOFFMANN et al., 2012). Diante do exposto, objetivou-se avaliar a utilização do cloreto de sódio para a obtenção do *TDH*, para a caracterização do grau de colmatção e das condições hidrodinâmicas em SACs plantados e não plantados, além de verificar a confiabilidade no uso desse traçador em testes executados durante os estádios de crescimento (logo após o corte da parte aérea) e de florescimento das plantas de taboa (*Typha latifolia*), além do risco de causar danos à espécie.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição das unidades em estudo

Os testes com traçadores foram realizados em dois sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS), em escala real, para o atendimento das necessidades de tratamento do esgoto doméstico gerado por pequenas comunidades (50 habitantes), instalados no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) (19°53'42S; 43°42'52'O). Essa unidade experimental fica localizada na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), da bacia hidrográfica do ribeirão Arrudas (ETE Arrudas), limite entre Belo Horizonte e Sabará (Minas Gerais), sendo disponibilizada por meio de um convênio entre o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Federal de Minas Gerais e a Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (COPASA).

Os sistemas avaliados são constituídos por um leito plantado com taboa (*Typha latifolia*) e outro mantido sem cobertura vegetal, ambos com comprimento de 25,0 m, largura do topo de 3,0 m e altura total de material filtrante de 0,4 m. A altura útil ou do nível d'água de projeto é de 0,3 m, indicando que deveria haver, superficialmente, uma camada não saturada, de 0,10 m, de material suporte (escória de alto-forno). A granulometria da escória de alto-forno é equivalente à da brita #2 (d_{10} de 19 mm), com coeficiente de desuniformidade (d_{60}/d_{10}) igual a 1,2 e volume de vazios de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PAOLI & VON SPERLING, 2013a). Os sistemas são alimentados de forma contínua por esgoto sanitário tratado, proveniente do UASB, com vazão afluyente de projeto de $7,5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Para assegurar o controle das vazões, após o reator anaeróbico, o efluente passa por uma caixa reguladora, que distribui $15,0 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, por meio de um vertedor, para outra caixa, sendo o restante descartado (encaminhado à rede de tratamento da COPASA). Na caixa de distribuição, a vazão é dividida igualmente entre as unidades, plantada e não plantada (controle). Com essas configurações e vazão de entrada, o tempo de detenção hidráulica teórico é 1,2 d.

Os SACs-EHSS avaliados neste trabalho estão em operação contínua há sete anos (desde 20-06-2007), tendo funcionado como pós-tratamento de efluente anaeróbico, com exceção do período de agosto de 2011 a novembro de 2013, em que exerceu o polimento de um sistema composto por reator UASB e filtro percolador em série. Esse tempo de operação e de monitoramento dos SACs propiciou a geração de grande base de dados, além de estar num período de funcionamento em que o fenômeno de colmatção já pode ser observado (NIVALA & ROUSSEAU, 2009; KNOWLES et al., 2011). Conforme pode ser visto na Figura 1, os SACs avaliados apresentam grau avançado de colmatção, ocorrendo escoamento superficial próximo às entradas do afluyente. Durante o tempo de operação do sistema, houve períodos de maior e de menor avanço da água sobre a superfície do leito, sendo que os eventos mais críticos coincidiram com um problema de corrosão no separador trifásico do reator UASB, liberando mais sólidos no efluente e obstruindo o espaço poroso. Dessa forma, em função do fenômeno relatado (escoamento superficial), levou-se em conta a altura total do leito (0,4 m) no cálculo do volume de poros considerado para as análises feitas a seguir.



FIGURA 1. Unidades avaliadas: a) SAC-EHSS plantado e b) SAC-EHSS não plantado no CePTS.
Evaluated units: a) Cropped HSSF CW; b) Uncropped HSSF CW.

Teste com traçador

Para a quantificação da concentração de sódio no meio, foi utilizada a sonda *Global Water® WQ301A-O*, que possui intervalo de detecção de condutividade elétrica (*CE*) de 0 a 5.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Para armazenamento de dados de forma automática, a sonda foi acoplada a um *data logger*, tendo sido os dados coletados em um intervalo de coleta bem menor do que o valor de 0,10 *TDH*, tal como recomendado por HEADLEY & KADLEC (2007). A sonda foi colocada para medição da *CE* no efluente dos SACs, de forma a propiciar, primeiramente, a obtenção do valor de condutividade de *background*, calculado pela mediana dos valores anteriores à aplicação do sal, e os resultados após influência do traçador.

Testes preliminares foram realizados na unidade não plantada, de forma a ter uma medição superior à do *background*, mas que, no entanto, não superasse a capacidade máxima de leitura do condutivímetro da sonda e não provocasse salinidade e morte à taboa. Entretanto, não foi possível seguir, plenamente, a recomendação de HEADLEY & KADLEC (2007), que sugerem valores de 10 a 20 vezes aqueles comumente encontrados no sistema (*background*), por causa da capacidade de leitura do condutivímetro. Após algumas tentativas, chegou-se à concentração de pulso adequada a ser aplicada no sistema para garantir as premissas discutidas anteriormente, que foi de 66,67 g L^{-1} de NaCl. Esse valor é inferior ao da solubilidade do NaCl em água, que é de 365 g L^{-1} , a 20 °C, possibilitando, então, a mistura completa do sal. Com base nisso, a solução traçadora foi preparada adicionando-se 10 kg de NaCl em 150 L de água.

Para caracterizar um pulso, o tempo de aplicação não foi instantâneo, para não gerar problemas de diferenças de densidade da solução salina e do líquido em tratamento no SAC, mas sempre inferior a 2% do *TDH* do sistema (0,024 d ou 35 min), tal como recomendado por BRACHO et al. (2009), citados por POSSMOSER-NASCIMENTO (2014). Os testes foram realizados nas unidades, plantadas antes e após o corte da parte aérea, e não plantadas (controle), para poder comparar o grau de colmatção, porcentagens de recuperação, confiabilidade, além do possível efeito deletério às plantas, quando da aplicação do traçador salino, sob diferentes condições operacionais do sistema. Os detalhes dos ensaios estão resumidos na Tabela 1, e aspectos visuais dos SACs antes e após o corte da parte aérea estão apresentados na Figura 2.

Durante a realização do teste no SAC plantado com taboa, em fase final de desenvolvimento, houve interrupção no fornecimento da energia elétrica e, conseqüentemente, de esgoto sanitário aos SACs, mas como esse evento teve duração de apenas 4 h (de 7 às 11 h do dia 27-06), o que representa menos de 3,33% do tempo de monitoramento, o teste não foi abortado. A interrupção ocorreu entre os minutos 2.400 e 2.640 após o início da aplicação do sal. Durante a condução desse teste, foram observadas oscilações na curva de distribuição de concentração em função do tempo, que poderiam ser creditadas às características de sistemas plantados ou a esse evento de interrupção do fornecimento de esgoto sanitário. Para investigar o fato e melhor observar a tendência do SAC cultivado com taboa, o intervalo de coleta de dados após o corte das plantas foi menor, havendo registro a cada 10 min.



FIGURA 2. Aspecto visual das plantas de taboa, a) em fase final de crescimento (florescimento da espécie) e b) logo depois de efetuado o corte de sua parte aérea, no SAC-EHSS. **Southern cattail visual aspect: a) in the final growth stage (flowering) and b) after shoot cutting, in the HSSF-CW.**

TABELA 1. Resumo dos ensaios realizados nos SACs-EHSS avaliados no estudo. **Summary of tests performed in the evaluated HSSF-CWs.**

SISTEMA	Altura média da taboa (cm)*	Horário da aplicação (D e H)***	Duração da aplicação (min)	Intervalo de coleta dos dados (min)
SAC plantado em estágio de florescimento	240	25/06/14, às 15h00	26	20
SAC controle	-	03/07/14, às 10h41	18	20
SAC plantado em estágio de crescimento	11**	01/08/14, às 13h24	20	10

* Acima do nível do leito; ** Corte da parte aérea efetuada no dia 31/07/14; *** Data e Hora.

A concentração equivalente de cloreto de sódio foi calculada utilizando a equação de calibração (Equação 1) obtida por POSSMOSER-NASCIMENTO (2014), utilizando a mesma sonda, na qual se obteve R^2 igual a 0,9989. Como foi a adição do sal que causou a alteração da condutividade elétrica, os valores medidos (CE_{med}) devem ser descontados daqueles encontrados comumente no meio (*background*, CE_{back}), para encontrar a concentração de NaCl.

$$[NaCl] = 0,5258 \times (CE_{med} - CE_{back}) - 3,4836 \quad (1)$$

Durante a realização dos testes, as vazões afluente e efluente foram medidas em diferentes momentos e em situações em que elas eram essenciais, antes e após o corte da parte aérea, e na unidade sem vegetação. No SAC-EHSS, antes de ser efetuado o corte, as medições foram realizadas nos dias 25 e 28 de junho de 2014, 03 e 15 de julho de 2014, datas anteriores, durante e após a adição do traçador salino. No sistema sem taboa, os dias de monitoramento da vazão foram 03, 07, 14 e 15 de julho de 2014, também representativos das condições nas quais foram realizados os ensaios. Após o corte da parte aérea das plantas, as vazões foram medidas nos dias 1^o e 2 de agosto de 2014, datas que coincidiram com o período da planta recém-cortada e em início de rebrota. A cada dia, ao menos três repetições foram realizadas, de forma a melhor caracterizar a vazão de entrada e saída da água residuária, importantes variáveis para a observância das condições hidrodinâmicas no sistema.

Cálculo das condições hidrodinâmicas

Para a comparação entre as respostas das condições hidrodinâmicas que os traçadores deram em cada um dos sistemas, foram calculadas algumas variáveis como: tempo de detenção hidráulica

teórico ou nominal (TDH_n), conforme [eq. (2)]; TDH médio aferido (TDH_m), [eq. (3)] (METCALF & EDDY, 2003); eficiência volumétrica (e_v), [eq. (4)] (KADLEC & WALLACE, 2009) e hidráulica (λ), [eq. (5)] (PERSSON et al., 1999); número de dispersão (d), [eq. (6)], segundo LEVENSPIEL (2000), para sistemas com alta dispersão; número de tanques em série, [eq. (7)] (LEVENSPIEL 2000); índices de curtos-circuitos (ICC), [eq. (8)] (METCALF & EDDY, 2003); e porcentagem de recuperação do traçador (Rec), [eq. (9)], presentes no Quadro 1.

A vazão média foi utilizada nos cálculos como intuito de diminuir os efeitos que a perda hídrica (evaporação e transpiração) pode causar na comparação entre o TDH_n e TDH_m (BRASIL & MATOS, 2008).

TABELA 2. Equações utilizadas para o cálculo das condições hidrodinâmicas nos SACs-EHSS.
Equations used to calculate hydrodynamic conditions in HSSF-CWs.

$TDH_n = \frac{V_p}{\bar{Q}} = \frac{L \cdot b \cdot h \cdot \epsilon}{\bar{Q}}$	(2)	$TDH_m = \frac{\int t \cdot c(t) dt}{\int c(t) dt}$	(3)
$e_v = \frac{TDH_m}{TDH_n}$	(4)	$\lambda = \frac{t_p}{(TDH_n)}$	(5)
$\frac{\sigma^2}{(TDH_m)^2} = 2d - 2d^2 \cdot (1 - \exp^{-d})$	(6)	$g(t) = \frac{N}{TDH_m \cdot \Gamma(N)} \times \left(\frac{N \cdot TDH_n}{TDH_m}\right)^{N-1} \times \exp\left(-\frac{N \cdot TDH_n}{TDH_m}\right)$	(7)
$ICC = \frac{t_i}{TDH_m}$	(8)	$Rec = \frac{\sum [NaCl] \times Q_{eff} \times t_m}{m_{adic}}$	(9)

em que,

V_p , é o volume de poros, em m^3 , dado pelo produto do comprimento (L), largura (b), altura (h) e porosidade do leito (ϵ);

\bar{Q} é a média das vazões afluyente e efluente ($m^3 d^{-1}$);

$c(t)$ é a concentração de cloreto de sódio ($mg L^{-1}$);

t é o tempo referente à concentração medida (min);

t_p é o tempo que corresponde ao pico (maior concentração) (min);

σ^2 é variância;

$g(t)$, função gama, e $\Gamma(N)$, função gama de $N = (N - 1)!$;

t_i é o tempo no qual ocorre a primeira aparição do traçador (min);

Q_{eff} é a vazão efluente ($m^3 min^{-1}$);

t_m é o intervalo de armazenamento de dados (min), apresentado na Tabela 1,

m_{adic} é a massa adicionada do traçador (g)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Monitoramento da concentração de NaCl nas unidades avaliadas

Após o monitoramento, aquisição de dados e conversão dos dados de CE em concentração de cloreto de sódio equivalente (Equação 1), foi possível construir as curvas de distribuição da concentração efluente ao longo do tempo, apresentadas na Figura 3, resultando nas variáveis listadas na Tabela 2.

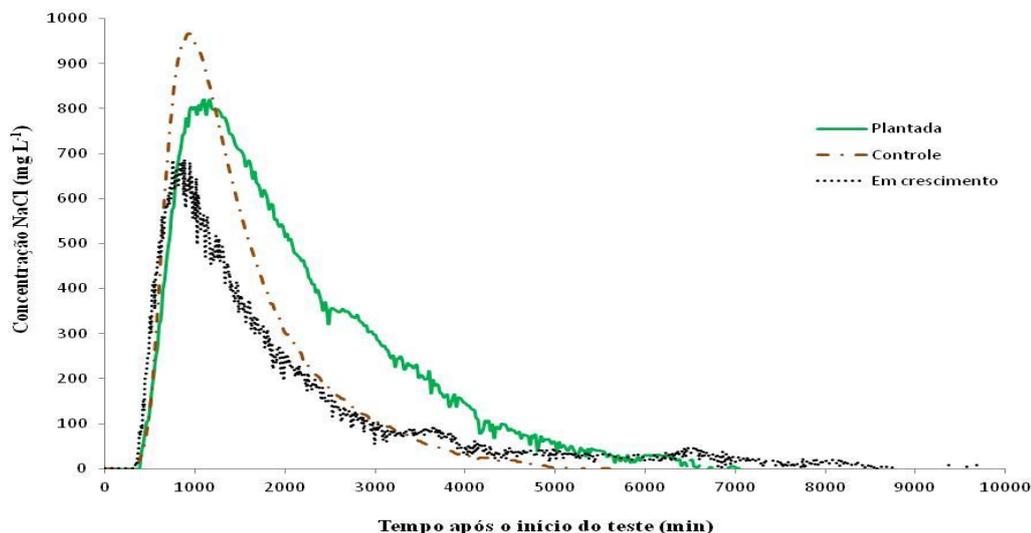


FIGURA 3. Curva da concentração efluente de cloreto de sódio em função do período após a aplicação do traçador, no SAC-EHSS plantado, antes e após o corte da parte aérea, e no SAC-EHSS controle. **Curve of sodium chloride effluent concentration as a function of the time after tracer applied in HSSF-CW cropped, before and after shoot cutting, and in unplanted HSSF-CW.**

O formato das curvas de distribuição da concentração efluente de cloreto de sódio, em função do tempo de início do teste com o traçador, indica maior uniformidade na curva obtida no SAC não plantado, com pequenos picos na unidade plantada, nos dois diferentes momentos de avaliação. Essa tendência pode ser explicada pela maior tortuosidade no caminho da água residuária no SAC plantado, já que não houve interrupção do fornecimento de esgoto após o corte da parte aérea. Assim, essas oscilações foram atribuídas às possíveis retenções e liberações mais lentas do sal no SACs-EHSS plantado, em decorrência da presença de maior quantidade de matéria orgânica (viva e morta) no meio poroso.

TABELA 3. Variáveis medidas e calculadas nas três condições dos SAC-EHSS, após a aplicação do traçador salino. **Measured and calculated variables in the three conditions of HSSF-CW, after application of saline tracer.**

VARIÁVEL	UNIDADES	SISTEMA		
		SAC plantado em estágio de florescimento	SAC controle	SAC plantado em estágio de crescimento
Q_{afl}	$m^3 d^{-1}$	7,48	9,31	7,74
Q_{efl}	$m^3 d^{-1}$	6,08	7,73	6,85
Perdas	%	18,75	16,56	11,52
TDH_n	d	1,77	1,41	1,64
TDH_m	d	1,45	1,06	1,38
e_v		0,82	0,75	0,84
t_p	min	1165	924	885
λ		0,46	0,46	0,37
d		0,16	0,14	0,32
N		3	4	2
t_i	min	405	344	345
ICC		0,19	0,23	0,17
Rec	%	72	66	49

em que,

Q_{afl} é a vazão afluente,

Perdas, medida pela diferença entre Q_{afl} e Q_{efl} .

Perdas hídricas

As reduções nas vazões, segundo CHAZARENC et al. (2003) e CHAZARENC et al. (2010), contribuem para o aumento no *TDH* nos SACs, principalmente naqueles plantados, o que justifica o uso da vazão média entre afluente e efluente, a qual possibilita uma avaliação mais confiável do fenômeno da colmatação (comparativo entre os *TDH*, médio e nominal). Acredita-se que a maior parte das perdas se deve à evaporação e à transpiração nos sistemas.

A evapotranspiração no sistema foi menor do que a obtida quando as plantas se encontravam em estágio de crescimento, como também observaram BRASIL & MATOS (2008), já que a área foliar diminuiu com o corte. Esperava-se maior perda de água no sistema plantado que na unidade sem vegetação; entretanto, tal tendência não se verificou, logo após o corte da parte aérea das plantas. A colmatação, com a conseqüente maior exposição da água residuária em tratamento, em razão do escoamento superficial, parece influenciar nos resultados. O maior percurso da água residuária em escoamento superficial, no SAC não plantado, é a principal razão para o ocorrido.

Avaliação das condições hidrodinâmicas e do grau de colmatação nos SACs

Segundo CHAZARENC et al. (2003), espera-se obter *TDH* real (médio) entre 1,2 e 2,0 vezes inferior ao valor nominal, mesmo nas condições iniciais de funcionamento dos SACs, dada a heterogeneidade do material filtrante (porosidade, área superficial específica), sistema de distribuição e fatores climáticos, como evaporação e transpiração. Sabendo que o sistema está sendo operado continuamente há 7 anos e que há trechos com escoamento superficial, indício de obstrução do espaço poroso e presença de zonas mortas e caminhos preferenciais, a expectativa era de redução ainda maior no valor do *TDH* teórico. Os valores encontrados, no entanto, foram de 82; 84 e 75% do *TDH* teórico, respectivamente, para os SACs plantados em florescimento, SACs plantados em crescimento e SACs não plantados. Caso fosse levada em conta apenas a vazão afluente, os valores de eficiência volumétrica suplantariam 90%.

Não foi verificada nenhuma tendência aparente nos valores da eficiência hidráulica (λ) em relação ao estágio de desenvolvimento das plantas, possivelmente pela maior tortuosidade criada pelas "redes" radiculares, que proporcionam aumento no valor do tempo que corresponde ao pico de concentração do traçador no efluente (t_p), mas que não é possível prever no cálculo do TDH_n . Por outro lado, pela análise dos valores encontrados da eficiência volumétrica (e_v) e pelo índice de curtos-circuitos (*ICC*), verifica-se que o SAC plantado se encontra menos colmatado que o não plantado. O "empolamento", proporcionado pelo crescimento das raízes no meio do substrato, conforme relatado por BRIX (1997) e BRASIL & MATOS (2008), parece contribuir para essa maior facilidade de escoamento relatada pelos autores citados anteriormente. Além disso, as raízes e os rizomas que expandiram o espaço poroso, ao serem degradados, propiciam maior volume de vazios no meio, após sua morte e a degradação do material orgânico.

FU et al. (2013) ainda sugerem outro fator que poderia contribuir para o atraso da colmatação em unidades plantadas: a presença de regiões aeróbias próximas à zona radicular, que aceleraria a degradação do material orgânico. TANNER & SUKIAS (1995) também observaram valores de *TDH* superiores nas unidades plantadas, sendo inclusive maiores que o teórico, ao utilizar brometo como traçador, o que os autores justificaram como influência da evapotranspiração. Entretanto, acredita-se que a perda de água não pode, sozinha, explicar o maior *TDH* médio obtido neste trabalho, já que as comparações foram relativas e levaram em conta, também, as vazões de saída.

MAGALHÃES FILHO et al. (2013) utilizaram NaCl como traçador, numa concentração superior à utilizada neste estudo (solução preparada de 100 g L⁻¹) e observaram que a presença de plantas não diminuiu o *TDH*, pelo contrário, atenuou a obstrução do meio poroso no decorrer do período de tempo da aplicação. A presença vegetal, inclusive, reduziu o índice de curtos-circuitos em comparação com o observado no SAC não plantado, fato confirmado neste trabalho.

PAOLI & VON SPERLING (2013b) estudaram o mesmo leito, após 2 anos de operação e, por meio do uso de um traçador radioativo (⁸²Br), constataram que o SAC plantado se encontrava mais colmatado, apresentando valor de e_v de 0,89, contra 0,97, na unidade-controle. Dessa forma,

verifica-se que as plantas propiciaram maior atenuação do fenômeno, ao longo do tempo, assim como descrito por HUA et al. (2014).

O número de dispersão (d) e o número de tanques em série (N) indicaram que o SAC plantado tem regime de escoamento mais turbulento que o não plantado, tal como observaram PAOLI & VON SPERLING (2013b), sendo que o corte da parte aérea proporcionou aumento no valor de d , como pode ser verificado na Tabela 2. Segundo MAGALHÃES FILHO et al. (2013), a presença de plantas parece aumentar a capacidade de mistura do sistema. De acordo com SEIFERT & ENGESGAARD (2007), o escoamento por um meio mais irregular leva ao aumento da dispersão, que poderia ser explicado pelo aumento na concentração de sólidos (colônias de microorganismos ou não) ou mesmo pela presença de raízes e rizomas. Por causa de o sistema menos colmatado apresentar maior dispersão, o segundo fator apresentado parece ter sido mais importante na avaliação dessa variável hidrodinâmica. No entanto, o acúmulo de sólidos também é fator relevante, visto que houve aumento do valor de d do trabalho de PAOLI & VON SPERLING (2013b) para a avaliação atual. Após 2 anos de operação, o sistema apresentava número de dispersão de 0,084 e 0,079, respectivamente, na unidade plantada e não plantada.

Como o valor de d foi sempre maior que 0,01, os SACs avaliados podem ser considerados reatores de alta dispersão e, assim, outras equações de cálculo da variável d foram desconsideradas. Dessa forma, os resultados contrariam o demonstrado por ALCOCER et al. (2012), pois nem sempre meios com maior volume de poros são menos dispersivos, podendo a explicação estar na presença de raízes e rizomas e nem tanto pela obstrução dos poros. A maior turbulência verificada, após o corte da parte aérea das plantas, no escoamento da água residuária no meio poroso, pode estar associada às menores perdas hídricas no sistema que contribuem para a diminuição na dispersão em SACs (CHAZARENC et al., 2003), e à maior absorção de nutrientes na fase de crescimento, estágio que poderia favorecer, assim como outras situações de estresse, a formação de maior quantidade de pelos absorventes nas raízes das plantas (GARRETT et al., 2009).

Avaliação do uso do cloreto de sódio como traçador em SACs: Confiabilidade e salinidade

A porcentagem de recuperação de traçadores parece não ter grande influência nas medições do TDH em SACs, tal como observaram BORGES et al. (2009) e WILLIAMS & NELSON (2011). Os primeiros autores compararam fluoresceína sódica e rodamina WT, chegando a respostas semelhantes utilizando ambos os traçadores, apesar de o último ter tido menor porcentagem de recuperação. WILLIAMS & NELSON (2011), avaliando brometo, sal propenso à absorção, e rodamina WT, verificaram que as porcentagens de recuperação do traçador parecem não ser determinantes para a obtenção do TDH do sistema, inclusive proporcionando picos coincidentes. No presente trabalho, tais observações foram feitas comparando o SAC plantado, em momentos com diferentes capacidades de absorção de solutos do meio. Os resultados indicaram menor porcentagem de recuperação no período de estágio de crescimento, sem, no entanto, apresentar grandes diferenças na eficiência volumétrica. As condições de escoamento mudaram, porém como já discutido, isso parece ser intrínseco às condições ambientais e à planta, fugindo da "responsabilidade" do traçador.

A maior porcentagem de recuperação do cloreto de sódio no SAC plantado antes do corte da parte aérea contraria o que foi obtido, por exemplo, no trabalho de COTA et al. (2011). Os autores, utilizando o mesmo traçador salino, obtiveram recuperação de cerca de 98% em unidades plantadas com taboa, de cerca de 99%, naquelas plantadas com capim tifton e de 100% nas unidades não plantadas. Assim, uma possível explicação para os resultados obtidos neste estudo, de menor recuperação no SAC não plantado, poderia passar pela adsorção no material orgânico acumulado, teoricamente, em maior concentração nessa unidade. No trabalho de COTA et al. (2011), foram encontradas maiores recuperações, porém em operação de um SAC vertical com leito não saturado, e assim, com menor "oportunidade" para absorção, pelas plantas. Além disso, os autores relataram problemas de fitotoxicidade nas plantas, causados pela adição do sal, evidências não observadas no SAC plantado avaliado neste trabalho.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o cloreto de sódio pode ser utilizado como traçador para a avaliação comparativa do grau de colmatação de SACs. Considerando-se a possibilidade da densidade da solução traçadora ter influenciado nos resultados, há de se ter cautela na correlação entre os valores absolutos de e_v obtidos por PAOLI & VON SPERLING (2013b) utilizando outro tipo de traçador, com os obtidos neste trabalho. Torna-se possível inferir, no entanto, que as plantas atenuaram o efeito da colmatação, já que o SAC-EHSS plantado apresentou-se menos afetado pelo fenômeno, após cinco anos da avaliação de PAOLI & VON SPERLING (2013b).

CONCLUSÕES

- O traçador salino pode ser utilizado em estudos de avaliação do grau de colmatação de SACs, já que a porcentagem de recuperação do sal não influenciou sobre os resultados.
- O sistema alagado construído plantado apresenta-se, atualmente, menos colmatado que o não plantado, havendo tendência de mais rápida atenuação da obstrução de seus poros com o tempo de operação dos sistemas;
- O regime de escoamento é mais turbulento no SAC plantado, sendo que o corte da parte aérea aumenta a dispersão no meio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições e programas: Capes, CNPq, Fapemig, Funasa, Finep.

REFERÊNCIAS

- ALCOCER, D. J. R.; VALLEJOS, G. G.; CHAMPAGNE, P. Assessment of the plug flow and dead volume ratios in a sub-surface horizontal-flow packed-bed reactor as a representative model of a sub-surface horizontal constructed wetland. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.40, p.18-26, 2012.
- BODIN, H.; PERSSON, J.; ENGLUND, J. E. MILBERG, P. Influence of residence time analyses on estimates of wetland hydraulics and pollutant removal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.501, p.1–12, 2013.
- BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ROLDÃO, J. S. F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2, p.301-310, 2009.
- BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.13, p.323-328, 2008.
- BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**, Oxford, v.35, n.5, p.11-17, 1997.
- CHAZARENC, F.; MERLIN, G. GONTHIER, Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.21, p.165–173, 2003.
- CHAZARENC, F.; NAYLOR, S.; COMEAU, Y.; MERLIN, G.; BRISSON, J. Modeling the effect of plants and peat on evapotranspiration in constructed wetlands. **International Journal of Chemical Engineering**, Amsterdam, v.2010, p.1-6, 2010.
- COTA, R. S.; von SPERLING, M.; PENIDO, R. C. S. Tracer studies and hydraulic behaviour of planted and un-planted vertical-flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, Oxford, v.64, n.5, 2011.

- FU, G.; ZHANG, J.; CHEN, W.; CHEN, Z. Medium clogging and the dynamics of organic matter accumulation in constructed wetlands. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.60, p.393-398, 2013.
- GARMETT, T.; CONN, V.; KAISER, B.N. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants. **Plant, Cell and Environment**, v.32, p.1272-1283, 2009.
- HEADLEY, T. R.; KADLEC, R. H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. **Ecohydrology and Hydrobiology**, Warsaw, v.7, n.3-4, p.269-282, 2007.
- HOFFMANN, C. C.; HEIBERG, L.; AUDET, J.; SCHONFELD, B.; FUGLSANG, A.; KRONVANG, B. OVESEN, N. B.; KJAERGAARD, C.; HANSEN, H. C. B.; JENSEN, H. S. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.46, p.75-87, 2012.
- HUA, G. F.; ZHAO, Z. W.; KONG, J.; GUO, R.; ZENG, Y. T.; ZHAO, L. F.; ZHU, Q. D. Effects of plant roots on the hydraulic performance during the clogging process in mesocosm vertical flow constructed wetlands. **Environmental Science Pollution Research International**, Heidelberg, v.21, n.22, p.13017-13026, 2014.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, R.D. **Treatment wetlands**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 1016p.
- KNOWLES, P.; DOTRO, G.; NIVALA, J.; GARCIA, J. Clogging in subsurface flow treatment wetlands: occurrence and contributing factors. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.37, p.99-112, 2011.
- LANGE, J.; SCHUETZ, T.; GREGOIRE, C.; ELSASSER, D.; SCHULZ, R.; PASSEPORT, E.; TOURNEBIZE, J. Multi-tracer experiment to characterize contaminant mitigation capacities for different types of artificial wetlands. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, London, v.91, n.7-8, p.768-785, 2011.
- LEVENSPIEL, O. **Chemical reaction engineering**. 3rd ed. New York: John Wiley e Sons, 2000. 668p.
- MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; SILVA, J. B.; PAULO, P. L. Hidrodinâmica de um wetland construído combinado com um sistema por evapotranspiração como pré-tratamento. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Salvador, v.1, n.2, p.276-285, 2013.
- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1818p.
- NIVALA, J.; ROUSSEAU, D. P. L. Reversing clogging in subsurface-flow constructed wetlands by hydrogen peroxide treatment: two case studies. **Water Science and Technology**, Oxford, v.59, p.2037-2046, 2009.
- PAOLI, A. C.; VON SPERLING, M. Evaluation of clogging in planted and unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands: solids accumulation and hydraulic conductivity reduction. **Water Science & Technology**, Oxford, v.67, n.6, p. 1345-1352, 2013a.
- PAOLI, A.C.; VON SPERLING, M. Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands construídos de escoamento horizontal subsuperficial (unidades plantada e não plantada). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Salvador, v.1, n.2, p.213-222, 2013b.
- PEDESCOLL, A.; CORZO, A.; ÁLVAREZ, E.; GARCÍA, J.; PUIGAGUT, J. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. **Water Research**, Amsterdam, v.45, p.3579-3589, 2011.
- PERSSON, J., SOMES, N. L. G., WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, Oxford, v.40, n.3, p.291-300, 1999.

- POSSMOSER-NASCIMENTO, T.E. **Lodo em lagoas de polimento**: acúmulo e implicações no comportamento hidrodinâmico e no desempenho do sistema. 2014. 114f. Dissertação (Mestrado em Saneamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- PRATA, R. C. C.; MATOS, A. T.; CECOM, P. R.; LO MONACO, P. A. V.; PIMENTA, L. A. Tratamento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-amarelo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, n.6, p.1144-1155, 2013.
- SEIFERT, D.; ENGESGAARD, P. Use of tracer tests to investigate changes in flow and transport properties due to bioclogging of porous media. **Journal of Contaminant Hydrology**, New York, v.93, p.58-71, 2007.
- SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D.; FREITAS, C. H.; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.6, p.1576-1585, 2009.
- TANNER, C.T.; SUKIAS, J.P. Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. **Water Science and Technology**, Oxford, v.32, n.3. p.229-239, 1995.
- VERA, A.; ANDRADE, C.; FLORES, E.; NUÑEZ, M.; CÁRDENAS, C.; MORALES, E. Removal of nutrients and organic matter in a constructed wetland, in function of the development of the macrophyte *Typha dominguensis Pers.* **Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia**, Maracaibo, v.33, n.2, p.145-152, 2010.
- WILLIAMS, C.F.; NELSON, S.D. Comparison of Rhodamine-WT and bromide as a tracer for elucidating internal wetland flow dynamics. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.37, p.1492–1498, 2011.