

## II-221 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL AO LONGO DE OITO ANOS DE OPERAÇÃO

### **Mateus Pimentel de Matos<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa. Mestre em Recursos Hídricos e Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (DEA/UFV). Doutor em Saneamento pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (DESA/UFMG). Professor Adjunto no Departamento de Engenharia da UFLA.

### **Marcos von Sperling<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Sanitária pela UFMG. Doutor em Environmental Engineering - Imperial College, London. Professor Titular da UFMG.

### **Antonio Teixeira de Matos<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV. Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela UFV. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

### **Calebe Rodrigues Soares Santos<sup>(4)</sup>**

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais.

### **Daniel Filipe Cristelo Dias<sup>(5)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade do Algarve, Portugal. Mestre em Geotecnia e Ambiente. Universidade da Beira Interior, Portugal. Doutor em Saneamento pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (DESA/UFMG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras. Avenida Dr; Sylvio Menicucci, s/n, Kennedy - Lavras - MG - CEP: 37200-000 - Brasil - Tel: (35) 3829-4629- e-mail: [mateus.matos@deg.ufla.br](mailto:mateus.matos@deg.ufla.br)

## **RESUMO**

O desempenho de sistemas alagados construídos (SACs) depende, dentre diversos fatores, dos aspectos construtivos e operacionais, além da presença e tipo de espécie vegetal, bem como do tempo de utilização do leito. Essa última variável diz respeito, principalmente, ao fenômeno conhecido como colmatção, que implica em redução da porosidade drenável e que pode levar à perda de eficiência do sistema. Assim, o presente trabalho objetivou avaliar possíveis efeitos do tempo de operação de dois sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SACs-EHSS), um plantado com *Typha latifolia* e outro não plantado, em operação há oito anos. Durante esse período, o pré-tratamento e, assim, as características do afluente ao SACs-EHSS, variaram, o que tornou adequada a avaliação subdividida em etapas. A partir da análise de diversas variáveis (DBO, DQO, Sólidos Suspensos, Nitrogênio e Fósforo), não foram observados indícios de perda de eficiência do sistema na remoção de poluentes. Apesar disso, foi verificada influência da carga aplicada e do tipo de pré-tratamento a que o afluente foi submetido, em relação à capacidade da taboa (*Typha latifolia*) em remover nutrientes/poluentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Colmatção, Eficiência, Empolamento, Escoamento superficial, Sistemas plantados.

## **INTRODUÇÃO**

Sistemas alagados construídos (SACs) são unidades de tratamento de águas poluídas e residuárias, essencialmente naturais, de grande eficiência na remoção de poluentes. No entanto, seu desempenho é dependente de alguns fatores, como por exemplo, a espécie vegetal. Existem algumas espécies que possuem maior capacidade de absorção de nutrientes do que outras e, além disso, há maior necessidade por nutrientes no estágio de crescimento da planta (KADLEC & WALLACE, 2009).

Em função da capacidade limitada de absorção, a carga aplicada de nutrientes é outra variável de grande importância no sucesso do tratamento em SACs (MATOS *et al.*, 2010). À medida que as unidades removem poluentes, vai havendo formação de biofilme, crescimento de raízes, sedimentação, adsorção e filtração de sólidos que levam à redução do espaço poroso, o que pode proporcionar perda de eficiência na remoção de

poluentes, no fenômeno conhecido como colmatação (MATOS *et al.*, 2015). Assim, é importante que haja o monitoramento de SACs por longos períodos de tempo, de forma que se possa avaliar a magnitude da influência dessa e das demais variáveis no desempenho dessas unidades.

O presente trabalho objetivou, então, o monitoramento de dois sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SACs-EHSS), um plantado com taboa (*Typha latifolia*) e outro mantido não vegetado, de forma a se possibilitar a observação de possíveis alterações nas suas eficiências, ao longo dos oito anos de operação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS), localizado a 19°53'42"S e 43°42'52"O, na Estação de Tratamento de Esgotos do Arrudas, em Belo Horizonte. No local, estão instalados dois SACs-EHSS, em operação desde setembro de 2007, operando em paralelo e recebendo, continuamente, vazão de 7,5 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> de esgoto sanitário submetido a pré-tratamento (a ser detalhado, a seguir). Na Tabela 1 estão resumidas as informações dos aspectos construtivos das duas unidades de SACs-EHSS.

**Tabela 1: Aspectos construtivos e operacionais de projeto de cada SAC-EHSS**

VARIÁVEL	Unidade	Valor
<b>Altura total (meio suporte)</b>	m	0,4
<b>Altura útil (líquido)</b>	m	0,3
<b>Comprimento útil</b>	m	25,0
<b>Largura</b>	m	3,0
<b>Porosidade</b>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0,4
<b>Tempo de detenção hidráulica teórico (TDH)</b>	d	1,2

O meio suporte utilizado para preenchimento (até a altura de 0,4 m) foi a escória de alto forno, tendo D<sub>10</sub> de 19,1 mm e coeficiente de uniformidade 1,2 (DORNELAS *et al.*, 2009). Um dos leitos foi plantado com taboa (*Typha latifolia*), enquanto o outro foi mantido não plantado, para possibilitar a avaliação da influência da planta na remoção dos poluentes.

Ao longo dos oito anos de monitoramento (2007-2015) o sistema sofreu mudanças de configuração em termos de pré-tratamento do afluente aos SACs-EHSS e, por essa razão, o período foi dividido em três fases:

- **Fase 1** – SAC recebendo efluente de reator UASB geminado (20/06/2007 a 26/08/2011);
- **Fase 2** – SAC recebendo efluente de reator UASB convencional seguido por filtro biológico percolador aberto (FBPA) (26/08/2011 a 01/11/2013).
- **Fase 3** – SAC recebendo efluente de UASB convencional (01/11/2013 a 10/07/2015).

Além do tipo de pré-tratamento, outra variável que pode influenciar no desempenho dos SACs é o estágio de crescimento das plantas (KADLEC & WALLACE, 2009). Por esse motivo, subdividiu-se cada fase em subfases, estabelecidas pelo período entre cortes da parte aérea das plantas, realizados após período mínimo de três meses.

De forma a avaliar o desempenho ao longo do tempo de operação na eficiência dos sistemas, foram feitas coletas do afluente e efluente dos SACs, semanalmente. As variáveis escolhidas foram DBO (utilização do oxímetro, com leitura da DBO<sub>5</sub><sup>20</sup>), DQO (método titulométrico de refluxo fechado), sólidos suspensos totais (SST, método gravimétrico), nitrogênio total Kjeldahl (NTK, pelo método Kjeldahl), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, leitura em cromatógrafo) e fósforo total (PT, método molibidílico/colorimétrico), seguindo-se metodologia descrita em APHA; AWWA; WEF (2012). As informações das médias das cargas afluentes estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2: Carga superficial aplicada, em quilos por hectare/dia, nos dois SACs-EHSS, durante o monitoramento desses sistemas.**

Variável	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Plantado	Não Plantado	Plantado	Não Plantado	Plantado	Não Plantado
SST	80(210)	76(180)	67(50)	72(52)	151(286)	118(174)
DBO	86(61)	82(57)	35(19)	40(23)	59(33)	64(29)
DQO	195(103)	189(99)	105(55)	112(64)	233(119)	262(138)
NTK	36(11)	35(10)	31(12)	33(14)	30(12)	35(12)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,07(0,11)	0,07(0,12)	2,7(1,9)	2,7(2,3)	0,37(0,08)	0,43(0,03)
PT	3,3(2,1)	3,5(2,0)	4,5(2,3)	4,7(2,4)	-	-

P-total não foi determinado na Fase 3. Médias aritméticas e, entre parênteses, o desvio padrão.

Por se tratar de dados ambientais, sobretudo de unidades de tratamento de águas residuárias, empregaram-se análises estatísticas não paramétricas, utilizando-se o *software Statistica 8.0* para geração dos testes Kruskal-Wallis, Mann-Whitney e Wilcoxon, respectivamente para comparação de agrupamentos, dados independentes e pareados, sempre com nível de significância de 5%.

## RESULTADOS

Utilizando o teste estatístico *Mann Whitney* (5%), não foi encontrada diferença significativa nas variáveis medidas nos afluentes dos dois SACs, indicando que, dentro de cada fase, as unidades plantada e não plantada foram submetidas às mesmas condições, podendo-se comparar as suas eficiências pelo teste de *Wilcoxon*. Na Tabela 3 está apresentado o comparativo da porcentagem de remoção de poluentes nos SACs, por fase, além da avaliação comparativa entre os desempenhos, de acordo com a condição operacional (SAC Plantado e SAC não plantado).

**Tabela 3: Mediana das eficiências de remoção (%), calculada com base nas cargas afluentes e efluentes, nos dois SACs-EHSS, por fase e pela condição operacional**

Variável	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Plantado	Não Plantado	Plantado	Não Plantado	Plantado	Não Plantado
SST	83	88*	82	88*	82 n.s.	80
DBO	77 n.s.	76	75 n.s.	71	80	75 n.s.
DQO	79*	75	76 n.s.	74	78 n.s.	66
NTK	24 n.s.	24	36 n.s.	35	48*	30
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 6 n.s.	- 32	98*	97	12	-7,3
PT	52*	37	83	85 n.s.	-	-

n.s. - Diferença não significativa pelo teste de Wilcoxon (significância de 5%) para amostras pareadas; \* Estatisticamente maior pelo mesmo teste (SAC plantado x SAC não plantado).

P-total não foi determinado na Fase 3; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> tem apenas 2 dados de eficiência de carga, por isso não foi realizada a comparação estatística.

Observa-se que, em geral, não houve diferença significativa entre os SACs quanto à remoção de matéria orgânica, o que, segundo autores como Lee *et al.* (2004), se deve ao fato de os mecanismos de remoção serem predominantemente físicos. Por outro lado, para Zhao *et al.* (2009) e Fu *et al.* (2013), as plantas contribuem para aumento na eficiência de remoção da matéria orgânica, pela sua influência na comunidade microbiana e pela formação de malha de raízes, restringindo a passagem de sólidos. Assim, pode estar havendo contribuição dos sólidos vegetais e ressuspensão dos sólidos sedimentados, por ação das raízes (TANNER *et al.*, 1998), contrabalanceando o relatado efeito positivo das plantas, no que se refere a essa forma de remoção de poluentes nesses sistemas.

Para se ter boas condições de operação no sistema, há de se considerar a capacidade das plantas em remover a carga de nutrientes aplicada (MATOS *et al.*, 2010), devendo ser, por isso, considerada variável-chave. Observando-se, por exemplo, a dinâmica do nitrogênio no sistema, observa-se que o aporte do nutriente tem sido superior ao potencial de absorção das plantas. Além disso, ao se considerar que SACs-EHSS proporcionam ambiente predominante anóxico/anaeróbico, a nitrificação não é favorecida, sobretudo no início dessas unidades, o que, no entanto, pode ocorrer no trecho final. Esses fatores podem justificar as eficiências negativas na remoção de nitrato nas Fases 1 e 3. Já na Fase 2, a "produção" de nitrato ocorreu no FBPA, havendo tempo hábil para sua absorção pelas plantas e assimilação pelos microrganismos. Quanto ao fósforo,

a carga aplicada na Fase 2 (4,5 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) foi significativamente maior que a aplicada na Fase 1 (3,3 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), havendo maior remoção percentual desse nutriente/poluinte, porém com efeito não significativo da presença das plantas no sistema.

Importante ressaltar, também, que as eficiências na remoção dos poluentes apresentadas na Tabela 3 foram calculadas com base na carga, levando em consideração, portanto, o efeito das perdas hídricas. Na Fase 3, por exemplo, na qual foram registradas as maiores perdas hídricas, as medianas das remoções de DBO, com base na concentração seriam, respectivamente, para os SACs plantado e não plantado, de 74 e 72%.

Além da carga aplicada, da presença e do estágio de crescimento das plantas, e do tipo de pré-tratamento a que o afluente foi submetido, o tempo de operação também pode influenciar no desempenho das unidades, sobretudo em função da evolução do principal problema operacional dos SACs, que é a colmatação. O fenômeno pode implicar em redução no tempo de detenção hidráulica (TDH) real e, conseqüentemente, diminuição nas eficiências de remoção pelo sistema (KADLEC & WALLACE, 2009). Após oito anos de operação, os SACs encontram-se em avançado estágio de colmatação, apresentando escoamento superficial em boa parte de sua extensão (MATOS *et al.*, 2015). Para avaliação da eficiência dos sistemas em condições de considerável colmatação, construiu-se a Tabela 4, na qual estão apresentadas as medianas obtidas nas subfases da Fase 3 dos SACs plantado e não plantado.

**Tabela 4: Comparativo entre as medianas de remoção (%) das subfases, dentro da Fase 3, nas unidades plantada e não plantada.**

Unidade	Subfase	SST	DBO	DQO	NTK	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PT
<b>Plantada</b>	A	90a	43a	-	27ab	-	-
	B	73a	88a	-	59ab	-	-
	C	-	86a	25a	71a	-	-
	D	76a	73a	71a	17b	17	-
	E	90a	86a	92a	53ab	-	-
	F	68a	78a	84a	9ab	7,0	-
	G	85a	77a	83a	26ab	-	-
	H	60a	73a	49a	-	-	-
<b>Não Plantada</b>	A	88a	58a	73a	51a	-	-
	B	66a	87a	-	34a	-	-
	C	-	91a	23a	56a	-	-
	D	83a	70a	69a	9a	27	-
	E	71a	77a	86a	12a	-	-
	F	90a	72a	70a	-	-42	-
	G	74a	68a	59a	39a	-	-
	H	73a	74a	63a	-	-	-

Medianas seguidas pela mesma letra em cada coluna não diferem significativamente, pelo teste de Kruskal-Wallis, em nível de 5% de significância. As medianas de nitrato não foram comparadas por conter apenas um valor em cada subfase.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4, não se observa qualquer tendência, já que, para a grande maioria das variáveis analisadas, as diferenças são não significativas, ou seja, não houve diferença entre as subfases. De forma a ilustrar o que está descrito na Tabela 3, estão apresentadas nas Figuras 1 e 2 os *box plot* dos dados de DBO das subfases das três fases, tendo indicação da linha de variação da mediana no período. Também estão apresentadas as variações da carga aplicada.

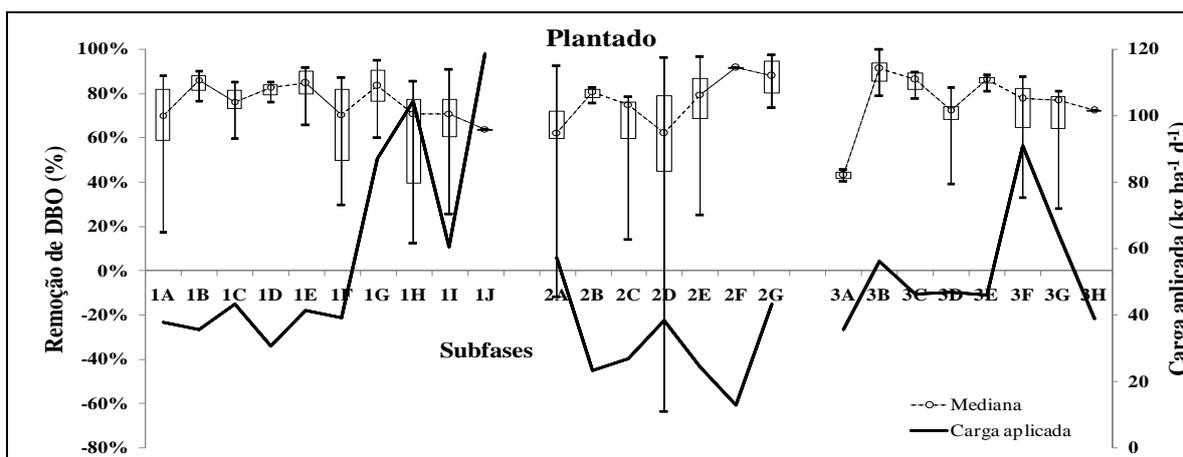


Figura 1: Box plot das subfases das três fases de monitoramento do SAC plantado.

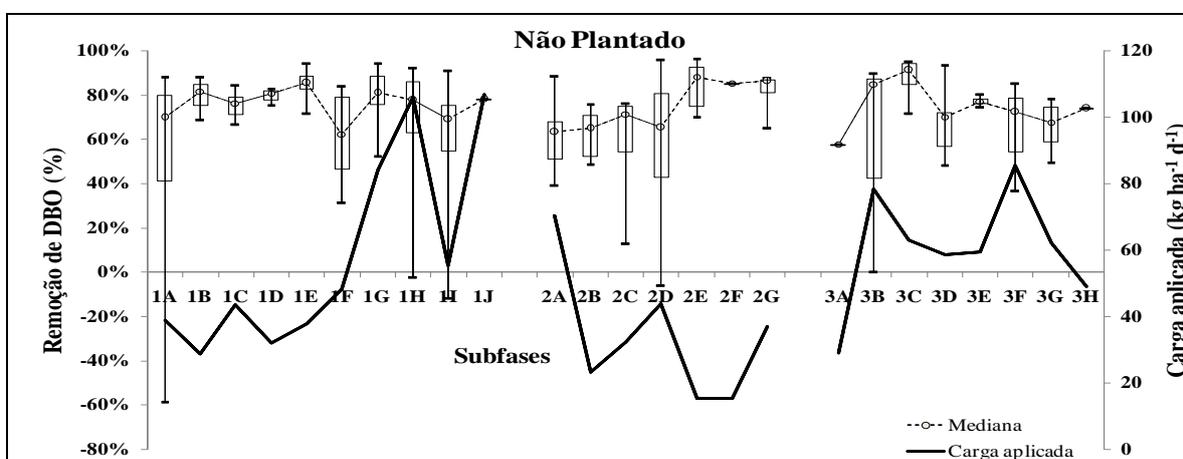


Figura 2: Box plot das subfases das três fases de monitoramento do SAC não plantado.

As variações nas eficiências de remoção de DBO parecem estar ligadas mais às condições de operação (cargas superficiais aplicadas) do que com o tempo de operação dos sistemas, como pode ser observado nas Figuras 1 e 2.

Mesmo sendo eliminados dados discrepantes da série coletada, retirando aqueles que estavam acima de  $Q_3+1,5(Q_3-Q_1)$  e abaixo de  $Q_1-1,5(Q_3-Q_1)$ , em que,  $Q_1$  e  $Q_3$  são, respectivamente, primeiro e terceiro quartis, não houve a apresentação de uma tendência bem definida, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4.

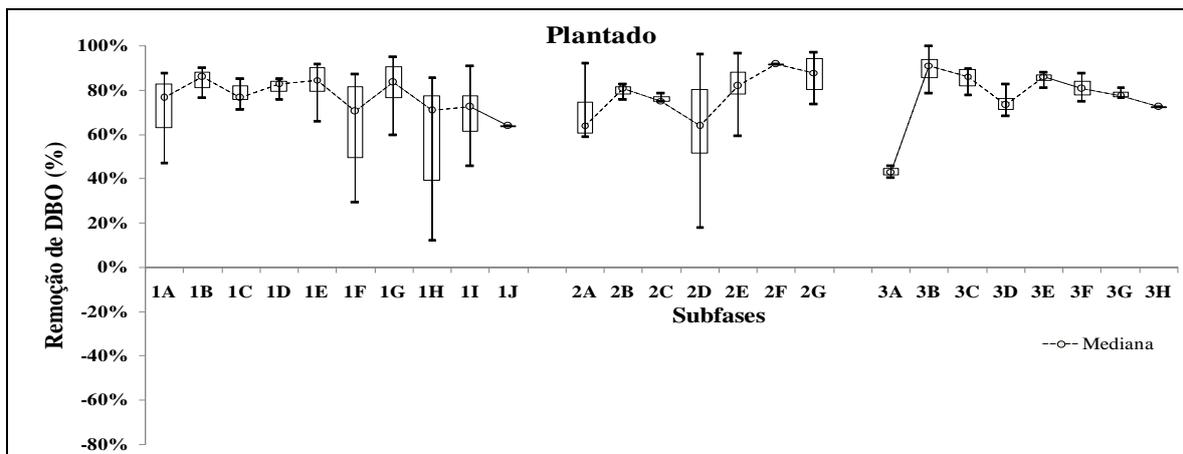


Figura 3: Box plot das subfases das três fases de monitoramento do SAC plantado, após a eliminação de dados discrepantes (*outliers*) da série.

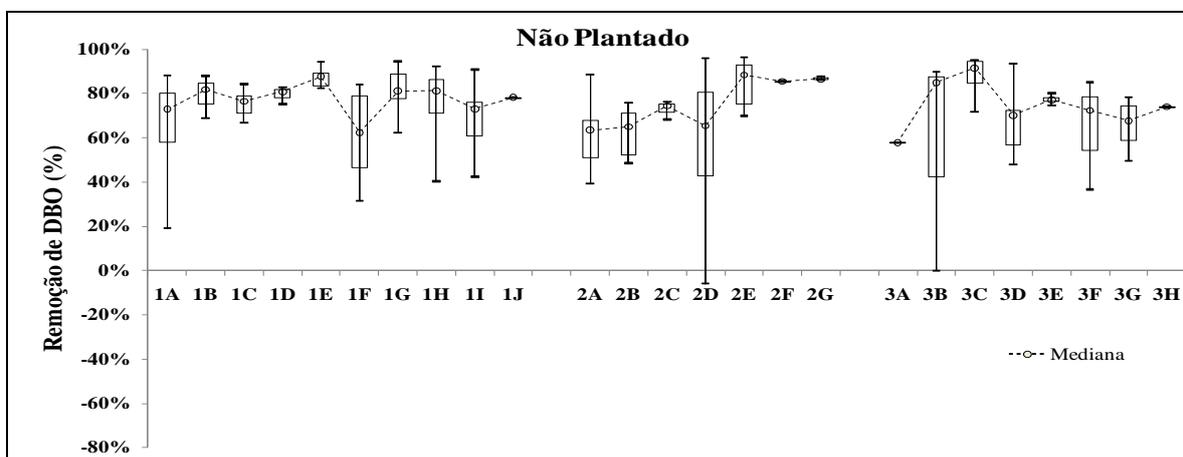


Figura 4: Box plot das subfases das três fases de monitoramento do SAC não plantado, após a eliminação de dados discrepantes da série.

Numa avaliação global de todos os dados, verifica-se não haver comprovação de perda de eficiência nos SACs-EHSS ao longo do período de oito anos de operação, ao contrário do relato de Tanner *et al.* (1998), porém corroborando Vymazal (2009). O autor monitorou a operação de unidades por um período ainda maior (15 anos) e também não encontrou evidências de redução na capacidade do sistema em remover poluentes. Os resultados indicam, primeiramente, a robustez dos SACs-EHSS, e dão base para se supor que a reinfiltração da água residuária em escoamento superficial numa seção não obstruída (WALLACE & KNIGHT, 2006) e o funcionamento tal como um SAC de escoamento superficial, permitem a manutenção de boas eficiências no sistema (NAZ *et al.*, 2009). Além disso, o acúmulo de material orgânico adsorvente, complexante e quelante (LUEDERITZ *et al.*, 2001) e o desgaste contínuo do material suporte, proporcionando a disponibilização de novos sítios ativos de retenção, também são fatores plausíveis de atenuação na perda de eficiência desses sistemas.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho, pode-se concluir que:

Não foram observados indícios de perda de eficiência na remoção de poluentes, no decorrer de um período de oito anos de operação dos SACs-EHSS avaliados, não havendo perceptível efeito da colmatação sobre esses resultados. Apesar disso, foi verificada influência da carga aplicada e do tipo de pré-tratamento a que o afluyente foi submetido, em relação à capacidade da taboa (*Typha latifolia*) em remover nutrientes/poluentes.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) e à Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) por todo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22a. ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 1496p, 2012.
2. DORNELAS, F.L., MACHADO, M.B., VON SPERLING, M.. Performance evaluation of planted and unplanted subsurface-flow constructed wetlands for the post-treatment of UASB reactor effluents. *Water Science and Technology*, v.60, p.3025-3033, 2009.
3. FU, G., ZHANG, J., CHEN, W., CHEN, Z. Medium clogging and the dynamics of organic matter accumulation in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v.60, p.393-398, 2013.
4. KADLEC, R.H., WALLACE, R.D., *Treatment Wetlands*. 2ª ed. Florida: CRC Press, 1016p., 2009.
5. LEE, C.Y., LEE, C.C.; LEE, F.Y.; TSENG, S.K.; LIAO, C.J. Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads. *Bioresource Technology*, v.92, p.173–179, 2004.
6. LUEDERITZ, V., ECKERT, E., LANGE-WEBER, M., LANGE, A., GERSBERG, R.M. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v.18, p.157–171. 2001.
7. MATOS, A.T., ABRAHÃO, S.S., BORGES, A.C, MATOS, M.P. Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.15, n.1. p.83-92, 2010.
8. MATOS, M.P., VON SPERLING, M., MATOS, A.T., PASSOS, R.G.. Uso de traçador salino para avaliação da colmatação e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. *Engenharia Agrícola*, v.85, n.6, 1137-1148, 2015.
9. NAZ, M., UYANIK, S., YESILNACAR, I., SAHINKAYA, E. Side-by-side comparison of horizontal subsurface flow and free water surface flow constructed wetlands and artificial neural network (ANN) modelling approach. *Ecological Engineering*, v.35, p.1255–1263, 2009.
10. TANNER, C.C., SUKIAS, J.P.S., UPSDELL, M.P. Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands. *Journal of Environmental Quality*, v.27, n.2, 1998.
11. WALLACE, S., KNIGHT, R. Small-scale constructed wetland treatment systems. In: *Feasibility, Design Criteria and O&M Requirements*. Water Environment Research Foundation (WERF), 1a ed., 304p., Alexandria, USA, 2006.
12. VYMAZAL, J. Horizontal sub-surface flow constructed wetlands Ondrejov and Spalene in the Czech Republic - 15 years of operation. *Desalination*, v.246, p.226–237, 2009.
13. ZHAO, L., ZHU, W., TONG, W. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science*, v.21, p.750–757, 2009.