

ANTOVER PANAZZOLO SARMENTO

**REMOÇÃO DE POLUENTES EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS  
DE ESCOAMENTO VERTICAL CULTIVADOS COM DIFERENTES  
ESPÉCIES VEGETAIS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola, para  
obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S246r  
2010

Sarmiento, Antover Panazzolo, 1986-

Remoção de poluentes em sistemas alagados construídos de escoamento vertical cultivados com diferentes espécies vegetais / Antover Panazzolo Sarmiento. – Viçosa, MG, 2010.

ix, 72f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Alisson Carraro Borges.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico.
  2. Saneamento rural.
  3. Alagadiços.
  4. Reatores biológicos.
  5. Plantas aquáticas. I. Universidade Federal de Viçosa.
- II. Título.

CDD 22.ed. 628.746

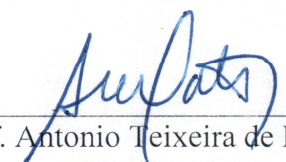
ANTOVER PANAZZOLO SARMENTO

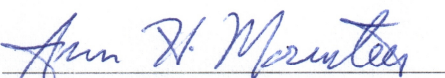
**REMOÇÃO DE POLUENTES EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS  
DE ESCOAMENTO VERTICAL CULTIVADOS COM DIFERENTES  
ESPÉCIES VEGETAIS**

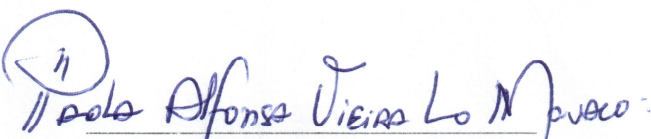
Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola, para  
obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

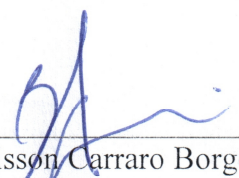
APROVADA: 18 de fevereiro de 2010.

  
Prof. Mauro Aparecido Martinez

  
Prof. Antonio Teixeira de Matos  
(Coorientador)

  
Prof.<sup>a</sup> Ann Honor Mounter

  
Prof.<sup>a</sup> Paola Alfonsa V. Lo Monaco

  
Alisson Carraro Borges  
(Orientador)

*Aos meus pais José Alfredo e Marlene Maria Panazzolo  
Sarmiento e minha irmã Mara Paula Panazzolo  
Sarmiento, pelo apoio e incentivo.*

*Ofereço e dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela fé e perseverança, presentes em todos os momentos.

À minha mãe, meu pai e minha irmã, por tudo aquilo que representam em minha formação pessoal.

À Isabella, pelo carinho e apoio em todos os momentos, e sua família, por sempre me receberem de braços abertos.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso, e à FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Alisson Carraro Borges, pela oportunidade, incentivo e orientação.

Ao Professor Antonio Teixeira de Matos, pelos conselhos, incentivo, coorientação e ajuda.

A Professora Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz, pela coorientação.

Ao Professor Paulo Afonso Ferreira, pela oportunidade, conselhos e pela orientação.

Aos membros da banca, Professores Ann Honor Munteer, Mauro Aparecido Martinez e Paola Alfonsa Vieira Lo Monaco pela participação e sugestões no trabalho.

Aos Professores do DEA/UFV, pelo conhecimento e auxílio quando solicitados.

A todos os funcionários do DEA pela eficiência, presteza e pela agradável convivência. E a todos os funcionários da UFV que contribuíram para a condução de meu experimento.

Aos amigos e colegas do DEA e da UFV.

Aos colegas de trabalho Ed Carlo, Maíke, Paola, Júnior e Fabiana pela contribuição ao longo deste trabalho. E a todos os amigos e colegas de curso, pela convivência e aprendizado durante os anos de minha vida acadêmica, sintam-se todos agradecidos.

Ao estagiário Rafael, pela disposição e contribuição com o trabalho.

E não podendo esquecer de todo pessoal da República “Tchê”, a república mais baguala de Viçosa.

## CONTEÚDO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
OBJETIVO.....	5
REFERÊNCIAS .....	6
<b>CAPÍTULO 1 - EFEITO DO TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICA E DAS ESPÉCIES VEGETAIS CULTIVADAS NO DESEMPENHO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO VERTICAL.....</b>	<b>9</b>
RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	10
1. INTRODUÇÃO .....	11
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	16
3.1. Caracterização da Água Residuária da Suinocultura.....	16
3.2. Influência das espécies vegetais na eficiência de remoção de poluentes da ARS .....	18
3.3. Influência do tempo de retenção hidráulica na eficiência de remoção de poluentes da ARS .....	22
3.4. Análise morfológicas das espécies vegetais.....	25
3.5. Carga mássica e aplicabilidade.....	27
4. CONCLUSÕES.....	29
REFERÊNCIAS .....	30

<b>CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO VERTICAL TRATANDO ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA .....</b>	<b>33</b>
RESUMO .....	33
ABSTRACT .....	35
1. INTRODUÇÃO .....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
3.1. Eficiência dos SACs na remoção de poluentes da ARS.....	40
3.1.1. Sólidos .....	42
3.1.2. Matéria Orgânica .....	44
3.1.3. Macronutrientes .....	48
3.1.4. Outras variáveis .....	52
3.2. Temperatura, umidade e evapotranspiração na casa de vegetação...	55
3.3. A planta e os nutrientes .....	56
3.3.1. Produção de massa.....	56
3.3.2. Absorção de nutrientes e sódio pelas plantas .....	58
4. CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS .....	61
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>67</b>
CONCLUSÕES GERAIS .....	67
SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	69
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>71</b>

## RESUMO

SARMENTO, Antover Panazzolo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Remoção de poluentes em sistemas alagados construídos de escoamento vertical cultivados com diferentes espécies vegetais.** Orientador: Alisson Carraro Borges. Coorientadores: Antonio Teixeira de Matos e Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz.

Sabe-se que a água residuária da suinocultura (ARS) pode ser tratada, aproveitada na agricultura ou ainda, ser despejada em corpos hídricos, desde que seja atendido o que está estabelecido na legislação ambiental vigente. Face à realidade brasileira, a escolha dos tipos de tratamentos nas áreas de criação de animais vem recaindo em sistemas de biorremediação que conjuguem baixos custos e simplicidade operacional. Dentre as soluções disponíveis para o tratamento da ARS, distingue-se a aplicação em sistemas alagados construídos (SACs). Objetivou-se, num primeiro momento, avaliar a influência do tempo de retenção hidráulica (TRH) e das espécies vegetais cultivadas em SACs de escoamento vertical na remoção de poluentes contidos na ARS. Foram estudados 12 SACs cilíndricos ( $\varnothing$  0,6 m x 0,3 m de altura, preenchidos com 25 cm de brita “zero”), sendo 3 cultivados com *Cyperus* sp. (tiriricão), 3 com *Heliconia rostrata* (helicônia), 3 com *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) e 3 controles (somente com a brita). A carga orgânica aplicada por unidade de área foi de 20 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO. A ARS foi submetida a tratamento por TRHs equivalentes a 24, 48, 72 e 96 h. Analisaram-se os afluentes e efluentes dos SACs, sendo as seguintes variáveis estudadas: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), potencial redox (Eh), turbidez, alcalinidade (AT), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total (N<sub>T</sub>), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal (N<sub>amon</sub>), nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), fósforo total (P<sub>T</sub>), potássio (K) e sódio (Na). As análises estatísticas foram realizadas no aplicativo WinStat 2.11, sendo utilizado o teste Tukey para a comparação entre médias, cuja avaliação procedeu-se em nível de 1% de probabilidade. Como resultado geral, notou-se que os SACs que trabalharam sob os maiores TRHs apresentaram as maiores remoções de poluentes. Nos SACs cultivados, observou-se remoção de NTK 1,3 vez maior em relação aos SACs não cultivados. Em relação à espécie vegetal a ser cultivada nos SACs de escoamento vertical e ao TRH mais apropriado, a melhor combinação observada foi a dos SACs cultivados com *Cyperus* sp. operando sob TRH de 72 h, que apresentaram as maiores remoções mássicas médias, com valores de 69,1% para

DQO, 56,5% para NTK, 61,7% para  $N_{amon}$ , 64,3% para fósforo e 55,0% para potássio. Após tal constatação, em uma segunda experimentação, monitorou-se por 90 dias, SACs de escoamento vertical tratando água residuária de suinocultura (ARS), com o objetivo de avaliar a contribuição do *Cyperus* sp. na remoção mássica dos poluentes contidos na ARS. Dois SACs de escoamento vertical (sendo um cultivado e um controle) foram operados em paralelo, sob um TRH de 72 h. As diferenças significativas observadas, quando considerando a eficiência média de remoção foram de 37,5 e 28,5% para o NTK, de 55,9 e 44,4% para o  $P_T$ , 30,2 e 25,6% para AT e 26,1 e 22,9% para CE nos SACs cultivado e não cultivado, respectivamente. Não se verificou diferença estatística entre os 2 SACs para as demais variáveis analisadas. Com absorção de nutrientes de 21,8; 2,1; 14,0 e 0,9 g m<sup>-2</sup> de N, P, K e Na, respectivamente, o *Cyperus* sp. apresentou produtividade, em termos de matéria seca (MS), de 674,5 g m<sup>-2</sup>, com uma taxa de produtividade de MS de 7,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Durante o período de condução do experimento, verificou-se que a evapotranspiração média (2,7 mm d<sup>-1</sup>), estatisticamente superior no SAC cultivado em relação ao não cultivado, foi fundamental na contabilização da remoção mássica das variáveis analisadas. Como conclusão geral, observou-se que o cultivo de plantas em SACs se faz importante para a obtenção de maiores remoções de nutrientes, além de propiciar a formação de um ambiente com melhor estética paisagística. Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que sistemas alagados construídos de escoamento vertical podem ser utilizados como etapa complementar no tratamento de efluentes suinícolas.

## ABSTRACT

SARMENTO, Antover Panazzolo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010. **Pollutants removal in vertical-flow constructed wetlands cultivated with different plant species.** Advisor: Alisson Carraro Borges. Co-advisors: Antonio Teixeira de Matos and Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz.

It is known that swine wastewater (SWW) can be treated, exploited in agriculture or be discharged to water bodies, provided it obeys what is established by environmental law. Given the Brazilian reality, the choice of types of treatments in the areas of animal husbandry has been focused on bioremediation systems that combine low cost and operational simplicity. The solutions available for the treatment of SWW include their application in constructed wetlands (CWs). The objective, initially, was to evaluate the influence of hydraulic retention time (HRT) and cultivated plant species in vertical-flow CWs (VFCWs) for pollutants removal. The organic loading per unit area applied was  $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  of COD, to 12 cylindrical CWs ( $\varnothing 0.6 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ , filled with 25 cm of gravel "zero"), 3 planted with *Cyperus* sp., 3 with *Heliconia rostrata*, 3 with *Hedychium coronarium* and 3 controls (unvegetated). The HRTs tested were 24, 48, 72 and 96 h. The influent and effluent of the CWs was analyzed, by quantifying the following parameters: pH, electrical conductivity (EC), redox potential (Eh), turbidity, alkalinity (TA), COD, TN, TKN,  $\text{NH}_x$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ , TP, K and Na. Statistical analysis was performed using the software WinStat 2.11, followed by the Tukey test for comparison between means, at a level of 1% probability. As a general result, it was noted that the greatest reductions were observed when CWs operated under a higher HRT. In planted CWs TKN removals were 1.33 times higher than in unplanted CWs. Regarding the type of plant being grown in the VFCWs and the most appropriate HRT, the best combination observed was that of CWs planted with *Cyperus* sp. operating at a HRT of 72 h, which had the highest average mass removals, with values of 69.1% (COD), 56.5% (TKN), 61.7% ( $\text{NH}_x$ ), 64.3% (TP) and 55.0% (K). In a second phase, after it was established that the *Cyperus* sp. at a HRT of 72 h was the best combination, the VFCWs was monitored for 90 days, to evaluate the contribution of *Cyperus* sp. in mass removal of pollutants in the SWW. Two VFCWs (planted and unplanted), were operated in parallel with a HRT equivalent to 72 h. Significant differences were observed between planted and unplanted CWs, when comparing the variables TKN (37.5 and 28.5%), TP (55.9 and

44.4%), TA (30.2 and 25.6%) and EC (26.1 and 22.9%). There was no statistical difference between planted and unplanted CWs for most of the variables analyzed. At a nutrient uptake of 21.8, 2.1, 14.0, and 0.9 g m<sup>-2</sup> of N, P, K and Na, respectively, the *Cyperus* sp. presented a dry matter productivity of 674.5 g m<sup>-2</sup>, with a dry matter yield of 7.5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Evapotranspiration (2.7 mm d<sup>-1</sup>), statistically higher in the planted CW, has a fundamental role in accounting for the mass removal of all variables. As a general conclusion, it was observed that VFCWs can be used to complement treatment of SWW and the cultivation of plants in the CWs is important to achieve higher removal of nutrients, as well as provide a more aesthetically pleasing environmental landscape.

## INTRODUÇÃO GERAL

### INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A criação de suínos (*Sus domesticus*) tem se apresentado como uma atividade importante, gerando renda e emprego nos vários setores da economia. A produção dentro da cadeia suinícola, quando comparada à de outras espécies de médio e grande porte, tem produzido grandes quantidades de carne, em reduzida área física e curto intervalo de tempo (Oliveira, 2006). Entretanto, este ainda é um setor que apresenta reduzida qualidade ambiental devido, principalmente, à emissão não controlada de seus efluentes que poluem os corpos hídricos e os solos, além de afetar a qualidade do ar.

Sabe-se que a água residuária da suinocultura (ARS) pode ser tratada, aproveitada para diversos fins na agricultura ou ainda ser despejada em corpos hídricos, desde que se atenda ao que está estabelecido na legislação ambiental vigente. Face à realidade brasileira, a escolha dos tipos de tratamentos nas áreas de criação de animais e exploração agrícola vem sendo focada em sistemas de biorremediação que conjuguem baixos custos e simplicidade operacional.

Os alagados naturais (*wetlands*) são considerados depuradores de água no ambiente, pois absorvem nutrientes e outras substâncias, reduzindo a contaminação de ecossistemas a jusante do ponto de lançamento dos despejos (Cole, 1998). Em razão de tal capacidade autodepuradora, sistemas alagados construídos (SACs) têm sido implantados com bons resultados no tratamento de águas residuárias desde as décadas de 1960 e 1970 (USEPA, 1999). O primeiro trabalho aceito cientificamente a utilizar o conceito foi o realizado em 1952 por Käthe Seidel, cientista alemã, que avaliou a capacidade dos sistemas na purificação da água, cultivando *Schoenoplectus lacustris* sobre brita e areia como meio suporte. Com estes estudos deu-se origem ao sistema Seidel, ou *Max Planck Institute Process* (MPIP), que consistia na implantação de um sistema com estágios de tratamento por escoamento vertical em SACs cultivados com *Phragmites australis*, seguidos de células de escoamento horizontal cultivadas

com *Schoenoplectus lacustris* e de outras células de escoamento horizontal cultivada com *Iris pseudacorus* (Kadlec e Wallace, 2009).

Esses sistemas se caracterizam por apresentar moderado custo de instalação, reduzido consumo de energia e manutenção, estética paisagística e aumento do habitat para a vida selvagem (Brasil *et al.*, 2007). Os SACs podem ser classificados em três tipos, conforme o escoamento utilizado: (i) superficial, (ii) subsuperficial horizontal e (iii) vertical. Cada tipo de escoamento proporciona um grau diferente de interação do efluente com as raízes, rizomas e biota microbiana (Salati, 2000).

Nos SACs do tipo vertical, consideram-se duas direções de escoamento: descendente (a mais frequente) e ascendente. Nos sistemas de escoamento vertical descendente, a distribuição do efluente é feita na superfície dos leitos e o deslocamento do líquido acontece por percolação. Nos sistemas de escoamento vertical ascendente, o movimento do líquido ocorre por contra-percolação (Salati, 2000).

O uso de SACs de escoamento vertical ou horizontal está aumentando em todo o mundo. Segundo Vymazal (2005), somente de escoamento horizontal já são mais de 50.000 na Alemanha, 8.000 na América do Norte, 1.000 na Áustria e muito mais em outros países. Em relação a SACs de escoamento vertical, ainda não se tem registros de levantamentos de dados relativos ao assunto, sendo que seu uso em maiores escalas pode ser considerado recente. Kadlec e Wallace (2009) citam que os SACs de escoamento vertical estão sendo utilizados com boa aceitação, , haja vista as reduzidas áreas demandadas para a instalação desses sistemas.

Em geral, os mecanismos envolvidos no tratamento por SACs são: filtração pelo meio suporte e pelo biofilme, degradação microbiana da matéria carbonácea e nitrogenada, absorção de nutrientes pelas plantas e adsorção no meio suporte, entre outros (Kadlec e Wallace, 2009).

Particularmente em relação à remoção de nitrogênio, sabe-se que nos SACs pode ocorrer em, no mínimo, 3 maneiras: (i) amônio oxidado a nitrito, e este, a nitrato por bactérias nitrificantes, em condições aeróbias, e posteriormente nitrato convertido a gás N<sub>2</sub>, em condições anóxicas, por bactérias desnitrificantes;

(ii) remoção via imobilização, por meio da absorção pelas plantas; (iii) e remoção por volatilização da amônia. Vymazal (2007) relata que além dos processos citados, pode ocorrer também a chamada oxidação anaeróbia de amônia, conhecida por processo ANAMMOX, em que, ocorre a conversão anaeróbia de  $\text{NO}_2^-$  e de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{N}_2$ .

Quanto ao fósforo, processos de precipitação química e adsorção, assimilação pelos vegetais e biofilmes formados no substrato e no sistema radicular da vegetação podem ocorrer frequentemente. Sabe-se que o fósforo solúvel é facilmente absorvido pelos sistemas radiculares das plantas aquáticas. Já a fração pouco solúvel associa-se ao ferro, ao alumínio e ao cálcio, tornando-se pouco assimilável pela planta, bem como pelos micro-organismos (Sousa *et al.*, 2004).

A mitigação dos metais pesados pode ocorrer por adsorção em sítios de troca iônica, ou precipitação como óxidos e sulfetos insolúveis. Além disso, os íons metálicos podem ser adsorvidos em hidróxidos de ferro e manganês ou complexados por compostos orgânicos, tais como ácidos húmicos e fúlvicos (DeBusk, 1999).

O mecanismo envolvido no processo de redução dos coliformes, totais e termotolerantes é uma combinação de fatores físicos, químicos e biológicos. Dentre os fatores físicos, destacam-se: a filtração proporcionada pelo sistema radicular das plantas e meio suporte, a fixação de biofilme no substrato e nas macrófitas e a sedimentação. Os fatores químicos envolvem oxidação, efeito biocida resultante de exsudatos radiculares de algumas macrófitas e adsorção ou complexação/quelatação pela matéria orgânica (Sousa *et al.*, 2004). O mecanismo biológico, segundo Rivera *et al.* (1995), inclui produção e efusão de substâncias químicas no ambiente que impedem o desenvolvimento de outros organismos, predação por nematóides e parasitas, ataque por bactérias líticas e vírus e morte natural.

A vegetação, de ação fundamental no tratamento em SACs, possibilita a remoção de nutrientes disponibilizados pela água residuária, extraíndo macro e micronutrientes, evitando seu acúmulo e a conseqüente salinização do meio, favorecendo, também, o desenvolvimento de filmes biologicamente ativos que

propiciam a degradação dos compostos orgânicos, concorrendo para mais eficiente e rápida depuração da água residuária (Kadlec e Wallace, 2009). As espécies vegetais frequentemente utilizadas em sistemas de tratamento em áreas alagadas são plantas helófitas, sendo escassas as pesquisas e utilizações de espécies ornamentais ou economicamente rentáveis.

Vários são os registros de SACs tratando águas residuárias agroindustriais sob condições de clima tropical, como por exemplo águas residuárias de laticínios (Matos *et al.*, 2008) e da lavagem e do despulpamento dos frutos do cafeeiro (Fia *et al.*, 2008).

Em relação à ARS, registram-se as revisões de Hunt e Poach (2001), Knight *et al.* (2000) e Cronk (1996), que compilaram dados sobre o uso de SACs para tratamento de ARS. No Brasil, Matos *et al.* (2009) em um experimento com SACs de escoamento subsuperficial horizontal, cultivados com *Typha latifolia*, *Alternanthera philoxeroides* e *Cynodon dactylon*, observaram remoções de 89,0%, 96,5%, 58,1% e 50,7% para DQO, Zn, N<sub>T</sub> e P<sub>T</sub>, respectivamente, com os SACs operando sob uma taxa de carregamento orgânico (L<sub>S</sub>) de 59,1 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO.

No que se refere a SACs de escoamento vertical, no Brasil, registra-se o estudo de Sezerino *et al.* (2003), que avaliaram esse sistema no pós tratamento de ARS efluente de sistema de lagoas de estabilização. Os autores afirmam, nesse estudo, que são necessárias mais pesquisas para ampliar os conhecimentos acerca dos mecanismos de remoção de nutrientes da ARS.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de melhor compreensão da remoção/retenção dos poluentes de ARS em SACs de escoamento vertical, uma vez que poucos são os relatos sobre o uso desses sistemas para tal proposta.

## OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a remoção de poluentes da água residuária de suinocultura, em sistemas alagados construídos de escoamento vertical cultivados com as espécies *Heliconia rostrata* (helicônia), *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) e *Cyperus* sp. (tiriricão), analisada com base na influência das plantas e no tempo de retenção hidráulica (TRH).

Para o cumprimento do objetivo geral, a pesquisa foi realizada em duas etapas. Na primeira fase, estudou-se SACs submetidos a choques de cargas orgânicas, com o intuito de se observar a robusticidade das plantas e, conseqüentemente, a melhor interação entre espécie vegetal e TRH. Após a definição de condição experimental ótima (espécie e TRH), realizou-se uma segunda experimentação, em médio prazo, na qual foram investigadas, durante um período de 90 dias, as diferenças na operação e desempenho entre sistemas cultivados e não vegetados, sendo que nesta etapa as plantas já estavam adaptadas a aplicação de ARS.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A. Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Typha* sp.) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12, n.3, p.266-272, 2007.
- COLE, S. The emergence of treatment wetlands. **Environmental Science & Technology**, v. 32, p. 218-223, 1998.
- CRONK, J.K. Constructed wetlands to treat wastewater from dairy and swine operations: A review. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.58, n.2-3, p.97-114, 1996.
- DEBUSK, W.F. **Waste water treatment wetlands: Application and treatment efficiency**. IFAS extension, University of Florida. 1999.
- FIA, R.; MATOS, A.T.; FERREIRA, P.A.; TEODORO, P.E.P.; SCHUERY, F. C.; LUIZ, F.A.R. Desempenho agrônômico da *Typha* sp. e *Aternanthera philoxeroides* Mart utilizadas no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro em sistemas alagados construídos. **Engenharia na Agricultura**, v.16, p.436-448, 2008.
- HUNT, P.G.; POACH, M.E. State of the art for animal wastewater treatment in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v.44, n.11-12, p.19-25, 2001.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. **Treatment Wetlands**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 1016 p.
- KNIGHT, R.L.; PAYNE, V.W.E.; BORER, R.E.; CLARKE, R.A.; PRIES, J.H. Constructed wetlands for livestock wastewater management. **Ecological Engineering**, v.15, n.1-2, p.41-55. 2000.
- MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; PEREIRA, O.G. Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*cynodon* spp) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. **Revista Ambiente & Água**, v.3, n.1, p.43-53. 2008.

- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; FIA, R.; MATOS, M.P. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura visando seu reuso. **Engenharia na Agricultura**, v.17, p.383-391, 2009.
- OLIVEIRA, W. **Uso de água residuária da suinocultura em pastagens da Brachiária “Decumbens” e Grama Estrela “Cynodom Plectostachyum”**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado). ESALQ, Piracicaba, SP, 2006.
- RIVERA, F.; WARREN, A.; RAMIREZ, E.; DECAMP, O.; BONILLA, P.; GALLEGOS, E.; CALDERÓN, A.; SÁNCHEZ, J.T. Removal of pathogens from wastewater by the root zone method (RZM). **Water Science and Technology**, v.32, n.3, p.211- 218. 1995.
- SALATI, E. **Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas**. Relatório técnico para o Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC. São Carlos. 36 p. 2000.
- SEZERINO, P.H.; REGINATTO, V.; SANTOS, M.A.; KAYSER, K.; KUNST, S.; PHILIPPI, L.S.; SOARES, H.M. Nutrient removal from piggery effluent using vertical flow constructed wetlands in southern Brazil. **Water Science and Technology**, v.48, n.2, p.129-135. 2003.
- SOUSA, J.T.; VAN HAANDEL, A.; LIMA, E.P.C.; HENRIQUE, I.N. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.9, n.4, p.285-290, 2004.
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. **Constructed Wetlands: Treatment of Municipal Wastewaters. (Manual)**. Cincinnati, Ohio, 165 p., 1999.
- VYMAZAL, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v.25, p.478-490, 2005.

VYMAZAL, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands.  
**Science of the Total Environment**, v.380, n.1-3, p.48-65. 2007.

## CAPÍTULO 1

### EFEITO DO TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICA E DAS ESPÉCIES VEGETAIS CULTIVADAS NO DESEMPENHO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO VERTICAL

#### RESUMO

Como objetivo precípua deste estudo, visou-se avaliar a influência do tempo de retenção hidráulica (TRH) e das espécies vegetais cultivadas em SACs de escoamento vertical, na remoção de poluentes. A carga aplicada orgânica por unidade de área foi de  $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO, sendo 9 SACs cilíndricos, cultivados com *Cyperus* sp. (tiriricão), *Heliconia rostrata* (helicônia) e com *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) separadamente e 3 SACs controle, não plantados. Os TRHs testados foram 24, 48, 72 e 96 h. As variáveis estudadas foram: pH, condutividade elétrica, potencial redox, turbidez, alcalinidade, DQO,  $N_T$ , NTK,  $N_{\text{amon}}$ ,  $N\text{-NO}_3^-$ ,  $P_T$ , K e Na. A comparação de médias foi realizada com o teste Tukey, em nível de 1% de probabilidade. Notou-se que as maiores remoções foram observadas quando os SACs trabalharam sob maiores TRHs. Nos SACs cultivados, observaram-se remoções médias (NTK) 1,3 vez maior que as obtidas nos SACs não cultivados. Concluiu-se que a melhor combinação observada foi a dos SACs cultivados com *Cyperus* sp. trabalhando sob o TRH de 72 h, com remoções mássicas médias de 69,1% (DQO), 56,5% (NTK), 61,7% ( $N_{\text{amon}}$ ), 64,3% (P) e 55,0% (K).

**PALAVRAS-CHAVE:** macrófitas tropicais, escoamento vertical, *Cyperus* sp., tempo de retenção

**EFFECT OF CULTIVATED SPECIES AND HYDRAULIC  
RETENTION TIME ON THE PERFORMANCE OF VERTICAL-  
FLOW CONSTRUCTED WETLANDS**

**ABSTRACT**

This study aimed to evaluate the influence of hydraulic retention time (HRT) and cultivated species in vertical-flow constructed wetlands (VFCWs) on pollutants removal. The organic loading per unit area applied was  $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  of COD, in 9 cylindrical CWs, planted with *Cyperus* sp., *Heliconia rostrata* and *Hedychium coronarium* and 3 controls, containing only gravel. The HRTs tested were 24, 48, 72 and 96 h. The influent and effluent of the VFCWs were analyzed, for the following parameters: pH, electrical conductivity, redox potential, turbidity, alkalinity, COD, TN, TKN,  $\text{NH}_x$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ , TP, K and Na. Statistical analysis was performed using WinStat 2.11 at the 1% level of probability according to the Tukey test. It was noted that the greatest reductions were observed when CWs was operated at higher HRT. In the planted CWs removals (TKN) 1.33 times higher than in unplanted CWs were observed. The best combination observed was that of CWs planted with *Cyperus* sp. operating at a 72 h HRT, which had the highest average mass removals, with values at 69.1% (COD), 56.5% (TKN), 61.7% ( $\text{NH}_x$ ), 64.3% (TP) and 55.0% (K).

**KEYWORDS:** tropical macrophytes; vertical flow pathway; *Cyperus* sp.; retention time

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, têm sido observados grandes avanços no desenvolvimento e na pesquisa de técnicas de tratamento de águas residuárias, tanto para satisfazer o tratamento em sistemas de maior complexidade, quanto para os de pequeno porte e simplicidade operacional, como lagoas de estabilização, reatores anaeróbios e sistemas alagados construídos (Mazzola *et al.*, 2005).

No entanto, no Brasil, o número de estudos científicos sobre SACs tratando efluentes agroindustriais ainda é modesto. Registram-se estudos recentes sobre o uso de sistemas de escoamento sub-superficial horizontal (Brasil *et al.*, 2007; Fia *et al.*, 2008 e Matos *et al.*, 2008), mas quando considera-se a possibilidade do uso de sistemas verticais, as informações de resultados de pesquisa podem ser consideradas escassas. Os SACs de escoamento horizontal, tem se mostrado promissores devido à alta capacidade em remover matéria orgânica, fácil implantação e baixo custo. Seguindo essa mesma linha de pesquisa, porém se objetivando melhor remoção de poluentes, em especial de nitrogênio, iniciaram-se os estudos em SACs de escoamento vertical, nos quais é de se esperar uma oxigenação maior do meio suporte e o favorecimento dos processos de nitrificação-desnitrificação.

Fatores adicionais às configurações de construção que influenciam diretamente na eficiência de remoção dos poluentes são o tempo de retenção hidráulica (TRH) adotado e a espécie vegetal cultivada no sistema. O TRH pode variar de horas até mesmo dias. As espécies vegetais, cada uma com sua particularidade, podem ser utilizadas separadamente ou de maneira consorciada, tentando combinar as qualidades e a absorção de nutrientes para determinados fins.

O TRH em SACs de escoamento vertical pode ser contabilizado de duas formas: considerando como sendo o tempo de esvaziamento do SAC após ter sido cheio (Cooper *et al.*, 1997) ou como o tempo de reação pré-estabelecido para permanência da água residuária no sistema (Mazzola *et al.*, 2005).

As plantas têm papel importante na remoção de nutrientes específicos. Matos *et al.* (2009a), relatam, por exemplo, a absorção de 106,8 g m<sup>-2</sup> de nitrogênio pela *Alternanthera philoxeroides* e a absorção de 10,7 g m<sup>-2</sup> de fósforo pela *Cynodon dactylon*. No entanto, apesar de considerável tempo de estudo em nível internacional, pode-se afirmar que o papel das plantas em SACs precisa ser melhor entendido (Brix, 1997; Mara, 2004).

Objetivou-se, com a realização deste trabalho, avaliar a influência do tempo de retenção hidráulica e das espécies cultivadas em SACs de escoamento vertical na remoção de poluentes da água residuária da suinocultura.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Conduziu-se o experimento em casa de vegetação, localizada na área experimental do Centro de Referência em Estudos Hídricos do DEA/UFV (Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa), situada na cidade de Viçosa, Minas Gerais (latitude 20°45'14" S, longitude 42°52'53" W, altitude média de 650 m e clima Cwa, segundo a classificação de Köppen).

Aplicou-se a ARS em recipientes metálicos, cilíndricos, cada um com dimensões aproximadas de 30 cm de altura, sendo 25 cm preenchidos com brita "zero" (diâmetro D<sub>60</sub> = 7,0 mm, coeficiente de uniformidade D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub> de 1,6 e volume de vazios de 0,491 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e 60 cm de diâmetro, que foram utilizados como SACs verticais.

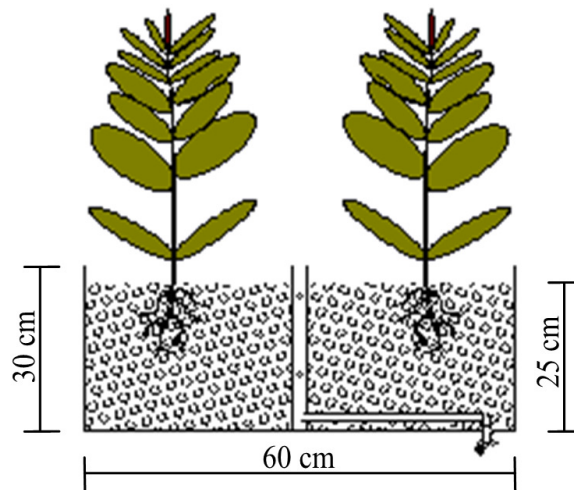
Três espécies vegetais foram utilizadas: (i) *Heliconia rostrata*, conhecida como helicônia ou bananeira-do-brejo, planta ornamental, de clima tropical, escolhida na tentativa de ser uma planta economicamente viável, com a venda de suas flores; (ii) *Hedychium coronarium*, conhecida popularmente como lírio-do-brejo, jacinto, cananéia ou mariazinha, escolhida com base na possibilidade de uma melhor estética paisagística; e (iii) *Cyperus* sp., denominada tiriricão, escolhida por ser uma planta com aparente robustez e que há em abundância em regiões inundadas.

O experimento foi constituído de quatro tratamentos, com três repetições cada, sendo eles: HEL – SACs cultivados com *Heliconia rostrata*, LIR – SACs cultivados com *Hedychium coronarium*, TIR – SACs cultivados com *Cyperus* sp. e BRI – SACs não cultivados (testemunhas). Quatro tempos de retenção hidráulica (TRH) foram utilizados para os SACs, sendo eles de 24, 48, 72 e 96 horas, os TRH correspondem ao tempo desde a abertura do registro até o esvaziamento do SAC, com as respectivas taxas de aplicação hidráulica (TAH) 63,7; 31,8; 21,2 e 15,9 mm d<sup>-1</sup>, o TRH foi controlado através da vazão efluente por meio de aferição manual (uso de cronômetro e proveta). A carga orgânica por unidade de área (L<sub>s</sub>) aplicada foi de 20 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO (Winter e Goetz, 2003). O arranjo experimental utilizado foi o de parcelas subdivididas, onde a parcela representou a espécie vegetal cultivada e a subparcela, o TRH.

Coletou-se, de zonas úmidas naturais de Viçosa-MG, e transplantou-se para os SACs, 3 mudas de plantas, que foram cultivadas em solução Hoagland 50%, para ambientação. Após o período de ambientação (90 dias), sucederam-se, as aplicações de ARS por 16 dias consecutivos, escalonando o TRH de 24 em 24 horas até chegar ao de 96 h e retornando, no mesmo escalonamento, ao de 24 h, visando a diminuição no erro experimental dos extremos.

Em cada SAC, aplicaram-se 18 dm<sup>3</sup> de ARS; após o preenchimento do SAC com a ARS abriam-se os registros e a ARS era drenada para recipientes de coleta.

Na Figura 1.1 está apresentado, uma visualização em corte, de um SAC vegetado.



**Figura 1.1.** Visualização em corte de uma das células de SAC.

A ARS foi coletada na entrada do sistema de armazenamento de ARS da UFV, localizada próximo à Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem da UFV e era constituída principalmente de urina e água de lavagem das baias de criação da suinocultura.

As concentrações afluentes e efluentes (brutas) das variáveis demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal ( $N_{amon}$ ), nitrato ( $N-NO_3^-$ ), fósforo total ( $P_T$ ), turbidez, potencial hidrogeniônico (pH), potencial de oxi-redução (Eh) e condutividade elétrica (CE) foram determinadas nas amostras a fim de se analisar o comportamento destas em cada tempo de retenção e em cada tratamento.

Para poder obter o valor real de redução mássica (com base na massa de poluente removida) nas variáveis analisadas, em cada ciclo de tratamento, era também registrado a evapotranspiração (volume inicial aplicado menos o volume final coletado) em cada SAC, fazendo-se a compensação da concentração no efluente coletado, em todos os SACs, em relação ao volume inicial.

Recolheu-se, também, amostras do material usado como meio suporte (brita “zero”) para análise respirométrica (análise do consumo de oxigênio pelos micro-organismos) pela método de Anderson (1982), que permite estimar a atividade biológica, inferindo sobre a presença ou não de micro-organismos aeróbios. Quantificou-se a taxa de respiração microbiana do meio suporte, por meio da quantidade de  $CO_2$  evoluído, o qual foi capturado em frascos contendo

100 mL de NaOH (0,25 mol L<sup>-1</sup>), em sistema contínuo de fluxo de ar (isento de CO<sub>2</sub> e umidade, por meio passagem do ar em frascos contendo NaOH 4 mol L<sup>-1</sup>). Após determinado período de incubação, procedeu-se então à titulação indireta do hidróxido de sódio com HCl (0,25 mol L<sup>-1</sup>); o excesso de NaOH que não reagiu com o CO<sub>2</sub> evoluído foi quantificado.

Todas as análises dos afluentes e efluentes foram determinadas no Laboratório de Qualidade da Água do DEA/UFV, conforme preconizado no *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 2005). Os métodos utilizados para determinação das variáveis estão apresentados na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1.** Métodos utilizados na determinação das variáveis

Variável	Método/Aparelho
Demanda Química de Oxigênio	Oxidação química em refluxo aberto
Nitrogênio total Kjeldahl	Processo semimicro Kjeldahl
Nitrogênio amoniacal	Processo semimicro Kjeldahl
Nitrato	Espectrofotometria
Fósforo total	Espectrofotometria
Potássio	Fotometria de chama
Sódio	Fotometria de chama
Turbidez	Turbidímetro
Potencial hidrogeniônico	Peagâmetro
Potencial de oxi-redução	Potenciômetro
Condutividade elétrica	Condutivímetro

As análises respirométricas, foram conduzidas no Laboratório de Herbicida no Solo do Departamento de Fitotecnia da UFV.

Amostras da parte aérea e da parte inferior (rizomas e raízes) das plantas foram secas em estufa com recirculação de ar, sob temperatura de 65 °C por 72 horas e posterior trituração em moinho tipo Wiley, de acordo com as recomendações de Silva (2009), para análises nutricionais. Tais diagnósticos foram realizados no Laboratório de Solos e Resíduos Sólidos do DEA/UFV.

Com base na análise nutricional da planta, realizou-se o cálculo da taxa de absorção de nutrientes pela mesma, sendo que a absorção é a concentração do nutriente multiplicada pela produção de massa da parte em questão a ser analisada

(aérea ou inferior), e esta absorção dividida pela área, resulta na taxa de absorção de nutrientes.

Os resultados obtidos foram analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA), complementando com teste de comparação de médias de Tukey. Os resultados estatísticos foram discutidos a 1% ( $P < 0,01$ ) de nível de significância para analisar as diferenças entre médias em nível mais restrito. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software estatístico WinStat 2.11 (Machado e Conceição, 2001) .

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Caracterização da Água Residuária da Suinocultura**

A água residuária gerada pela suinocultura da UFV, sob manejo seco, é constituída principalmente por urina e água de lavagem com restos de raspagem da parte sólida. Com base nos valores de DQO obtidos para a ARS bruta, a mesma foi diluída para atender o preestabelecido no item “material e métodos”. Observou-se não haver uma homogeneidade nos valores, devido, provavelmente, ao sistema de manejo que ora apresentava elevada quantidade de matéria orgânica e ora apresentava o inverso.

Para verificar a caracterização da ARS aplicada e as taxas de aplicação, das variáveis analisadas, resultantes das diluições apresenta-se nas Tabelas 1.2 e 1.3 a caracterização da ARS aplicada nos SACs conformes os TRHs e os valores das taxas de aplicação superficiais das variáveis analisadas no experimento, respectivamente.

Tabela 1.2. Caracterização da água residuária de suinocultura (ARS) diluída que fora aplicada nos respectivos tempos de retenção hidráulica (TRHs). (Valores médios)

Variáveis*	TRHs			
	24 h	48 h	72 h	96 h
DQO ( $\text{g m}^{-3}$ )	311,2	623,6	935,5	1245,3
NTK ( $\text{g m}^{-3}$ )	140,2	241,2	303,1	376,4
N <sub>amon</sub> ( $\text{g m}^{-3}$ )	120,6	225,8	270,6	317,0
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\text{g m}^{-3}$ )	0,2	0,3	0,4	0,6
P <sub>T</sub> ( $\text{g m}^{-3}$ )	18,4	24,6	29,6	38,4
K ( $\text{g m}^{-3}$ )	36,0	70,0	100,0	150,0
Na ( $\text{g m}^{-3}$ )	55,0	70,0	84,0	100,0
Turbidez (UNT)	28,9	35,8	46,6	54,1
pH	8,0	7,9	8,1	8,0
Eh (mV)	-101,0	-92,0	-110,0	-115,0
CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	1786,0	2000,5	2371,5	3108,0

\* Os valores são referentes às amostras já diluídas para a taxa de aplicação de DQO de  $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

Tabela 1.3. Taxas médias de aplicações superficiais ( $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) da água residuária de suinocultura (ARS) conforme os respectivos tempos de retenção hidráulica (TRHs).

Variáveis / TRH	L <sub>s</sub> ( $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )			
	24 h	48 h	72 h	96 h
DQO	19,8	19,8	19,9	19,8
NTK	8,9	7,7	6,4	6,0
N <sub>amon</sub>	7,7	7,2	5,7	5,0
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$12,7 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{-3}$
P <sub>T</sub>	1,2	0,8	0,6	0,6
K	2,3	2,2	2,1	2,4
Na	3,5	2,2	1,8	1,6

### 3.2. Influência das espécies vegetais na eficiência de remoção de poluentes da ARS

Os resultados obtidos no experimento e a análise estatística demonstraram que o SAC cultivado com *Cyperus* sp. apresentou, em geral, a maior redução na concentração de NTK (43,4%),  $N_{amon}$  (44,5%),  $P_T$  (54,5%) e K (31,1%), nas concentrações efluentes dos SACs, em relação aos outros tratamentos. O maior consumo de alcalinidade (redução de 28,0%) também foi observado no SAC cultivado com *Cyperus* sp.. Em relação à variável DQO, notou-se que não houve diferença estatística entre os tratamentos, conforme apresentado na Tabela 1.4.

**Tabela 1.4.** Valores médios de remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio), NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl),  $N_{amon}$  (Nitrogênio Amoniacal),  $P_T$  (Fósforo), K (Potássio) e AT (Alcalinidade Total) nos SACs em função do tratamento

Espécies	Redução (%)					
	DQO*	NTK*	$N_{amon}$ *	$P_T$ *	K*	AT*
<i>Cyperus</i>	59,6 a	43,4 a	44,5 a	54,5 a	31,1 a	28,0 a
<i>Hedychium</i>	59,0 a	34,1 b	34,5 bc	44,3 b	22,7 c	25,2 ab
<i>Heliconia</i>	57,2 a	33,8 b	36,9 b	37,6 c	21,4 c	25,4 ab
Controle	58,2 a	27,9 c	28,5 c	48,5 ab	27,6 b	23,6 b

Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey. \*1% de probabilidade.

Notou-se que não houve diferença significativa na remoção de DQO em função dos tratamentos cultivados e não cultivado, conforme evidenciado nos resultados das análises estatísticas. Tal observação também foi feita por Mazzola *et al.* (2005), que utilizaram SACs de escoamento vertical não cultivados e cultivados com *Typha* spp. e *Eleocharis* spp. ao tratarem o efluente de um reator anaeróbio compartimentado.

No México, foram realizados testes comparando SACs sob diferentes tipos de escoamento (Zurita *et al.*, 2009). Estudaram-se plantas ornamentais (*Zantedeschia aethiopica*, *Strelitzia reginae*, *Anthurium andreanum* e *Agapanthus africanus*) nos SACs, tratando esgoto doméstico, sob  $L_S$  média de  $9,9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO,  $1,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de NTK e  $0,3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $P_T$ , os pesquisadores observaram remoções de 83,3 e 77,1% de DQO, 50,5 e 51,7% de NTK, 50,6 e 35,8% de  $P_T$ ,

respectivamente, no SAC de escoamento vertical e no SAC de escoamento horizontal.

Mas a principal observação relatada pelos autores supracitados foi a diferença significativa nas concentrações de oxigênio dissolvido (OD) nos efluentes. Nos SACs de escoamento vertical, registraram-se valores superiores a  $2,0 \text{ g m}^{-3}$  de OD nos efluentes, enquanto nos sistemas de escoamento horizontal, as concentrações permaneceram próximas a zero (mesmo valor do afluente aplicado).

Yalcuk e Ugurlu (2009) ao utilizarem SACs de escoamento vertical cultivados com *Typha latifolia*, com uma camada de areia além da camada de brita, tratando lixiviado de aterro sanitário, sob uma TAH de  $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e uma  $L_S$  de  $2,4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $N_{\text{amon}}$ , obtiveram remoção média de 48,9% de  $N_{\text{amon}}$ , valor este próximo ao encontrado no presente trabalho em SAC cultivado com *Cyperus* sp. (44,5%) e superior aos demais tratamentos.

Os autores citados acima observaram, também, remoção média de 30,6% na DQO, sob  $L_S$  de  $4,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO, sendo este valor inferior a todos os observados neste trabalho. Um dos motivos para que este valor seja menor pode estar associado ao fato de que a relação  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  do lixiviado de aterro é muito reduzida, ou seja, a maior parte dos compostos orgânicos é de biodegradabilidade muito lenta.

Maiores remoções foram observadas por Ouattara *et al.* (2009), em SACs de escoamento vertical, tratando esgoto doméstico, sob valores de  $L_S$  médias de  $20,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO e  $2,1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $N_{\text{amon}}$ . Os autores reportam remoções de DQO equivalentes a 91,4 e 72,2%, para SACs cultivados com *Panicum maximum* e não cultivados, respectivamente. Em relação ao nitrogênio amoniacal, a remoção observada nos SACs cultivados foi de 86,5%, superior ao do sistema controle, equivalente a 65,9%.

Matos *et al.* (2009b) estudaram SACs de escoamento horizontal cultivados com *Typha latifolia*, *Alternanthera philoxeroides* e *Cynodon dactylon*, tratando ARS. Os sistemas operavam sob  $L_S$  médias de  $2,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $P_T$  e  $9,3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de NTK. Quando comparados os dados obtidos no presente trabalho, verifica-se que o SAC vertical cultivado com *Cyperus* sp. apresentou remoção de fósforo de

54,5%, valor superior ao relatado pelos autores citados (50,7%). Por outro lado, a remoção de NTK reportada pelos mesmos autores, equivalente a 58,7%; foi maior do que a verificada no presente estudo (43,4%). Entende-se que as remoções de nutrientes estejam ligadas principalmente com a absorção de nutrientes das plantas, podendo a remoção de nutrientes variar, então, com a necessidade nutricional das plantas.

O valor médio de elevação da concentração de nitrato no tratamento com o *Cyperus* sp. foi de 318,1%, seguido do *Hedychium coronarium*, do controle e da *Heliconia rostrata*, respectivamente, 220,6, 198,5 e 191,6%. Mesmo com o aumento na concentração de nitrato em todos os tratamentos, não se observou diferença estatisticamente significativa entre os mesmos. Em vista dos valores afluentes tão reduzidos de nitrato (quase nulos), mínimos valores observados no efluente resultam, aparentemente, em consideráveis elevações da concentração de nitrato.

O aumento na concentração de nitrato pode estar associado ao processo de nitrificação, devido ao fato de que os SACs de escoamento vertical oferecem melhores condições de oxigenação para a água residuária, atrelado ao fato de a aplicação ser intermitente, onde há um maior fornecimento de oxigênio no material filtrante, pois quando há o lançamento de água residuária, o oxigênio contido na massa do leito, se mantém, somando com a nova quantidade de oxigênio que sofre arraste pela nova aplicação (Kadlec e Wallace, 2009).

O SAC cultivado com *Cyperus* sp. foi o que mais removeu nitrogênio amoniacal, tendo, ao mesmo tempo uma maior nitrificação, apresentando relação direta entre os fenômenos. No entanto, a relação citada por Mazzola *et al.* (2005), de 1 g m<sup>-3</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> gerado para cada 5 g m<sup>-3</sup> de N<sub>amon</sub> consumidos, não foi observada. Um fator que está envolvido no sistema e pode afetar diretamente essa relação é o consumo de nitrogênio pelas plantas, pois estas absorvem o nitrogênio que necessitam, preferencialmente nas formas de nitrato e de amônio (o nitrogênio amoniacal é, em função do pH do meio, praticamente todo NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). No caso dos SACs não cultivados, em que não há a interferência da planta no meio, deve-se relevar a questão de que as concentrações de oxigênio dissolvido e de alcalinidade possam ser fatores limitantes a esta relação. Outro fator importante, citado por

Kadlec e Wallace (2009) é que os micro-organismos facultativos (presentes nos SACs) em condições anaeróbias e pH do meio superior a 7,0, na falta de O<sub>2</sub> no meio podem utilizar o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e o NO<sub>2</sub><sup>-</sup> como aceptores de elétrons substitutos, liberando no meio OH<sup>-</sup>, o que pode explicar, em parte, a elevação do pH nos SACs utilizados neste experimento.

Mazzola *et al.* (2005) estudando SACs de escoamento vertical encontraram valores inferiores de remoção de nitrogênio amoniacal (1,5-14,2%) ao comparar com os observados neste experimento (28,5-44,5%).

A disponibilidade de alcalinidade também é um fator que influencia o processo de nitrificação, conforme citado pela USEPA (1993) e exemplificado por Kadlec e Wallace (2009), para cada 1 mg de nitrogênio amoniacal nitrificado, aproximadamente 7,1 mg de alcalinidade (expressa sob a forma CaCO<sub>3</sub>) serão consumidos, no entanto, não verificou-se correlação direta entre estas variáveis para todos os tratamentos, exceto no tratamento com *Cyperus* sp., onde essa correlação foi verificada, havendo maior remoção de nitrogênio amoniacal e maior consumo de alcalinidade, o que acredita-se ter possibilitado maior nitrificação no meio. Nos demais tratamentos, onde não se verificou a mesma correlação, pode-se inferir que houve oxigenação inferior à proporcionada no tratamento com *Cyperus* sp., podendo-se atribuir a maior redução nas concentrações de nitrogênio amoniacal, comparativamente ao controle, a absorção pelas plantas.

Em relação ao potássio da ARS, observou-se que a maior remoção média foi obtida no SAC cultivado com *Cyperus* sp. (31,1%), seguido do SAC não cultivado (27,6%) e as menores reduções foram nos SACs cultivados com *Hedychium coronarium* (22,7%) e *Heliconia rostrata* (21,4%). Novamente, o SAC cultivado com *Cyperus* sp. apresentou desempenho semelhante ao observado em SACs horizontais (Matos *et al.*, 2009b).

Ao analisar os dados de turbidez (comparação entre médias dos tratamentos, teste Tukey, P < 0,01) notou-se que o tratamento com brita foi o que proporcionou a maior remoção (35,6%), seguido juntamente pelo tratamento com *Hedychium coronarium* e com a *Heliconia rostrata* (22,2 e 20,0%) e depois pelo *Cyperus* sp. (-1,3%) que, ao invés de remover aumentou a turbidez. Acredita-se

que essa elevação de turbidez e também a menor remoção de turbidez dos demais tratamentos esteja associada a liberação de exsudatos e detritos na rizosfera, pois, segundo Kadlec e Wallace (2009), os exsudatos liberados pelas raízes, que servem para ajudar a desintoxicar a rizosfera, são compostos orgânicos que podem influenciar a turbidez do meio líquido.

Nas análises respirométricas, foram obtidos os valores de  $34,8 \mu\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$  e  $25,3 \mu\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$  [ $\text{CO}_2$  produzido por massa de meio suporte inoculado] nos SACs vegetados e não vegetados, respectivamente. Observa-se que os sistemas não cultivados (controles) apresentaram menor taxa respirométrica.

A maior respiração nos SACs cultivados pode ser relacionada com os sítios da região rizosférica, que proporcionam maior área para formação de biofilmes bacterianos. Tal constatação (maior respiração nos SACs vegetados), somada à observação de remoções significativamente ( $P < 0,01$ ) superiores de NTK,  $N_{\text{amon}}$  e K, reforça a idéia da importância do cultivo de plantas em sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuárias.

### 3.3. Influência do tempo de retenção hidráulica na eficiência de remoção de poluentes da ARS

Com base nas análises estatísticas em relação ao TRH (Tabela 1.5), pode-se observar, analisando o conjunto, que o TRH de 72 h proporcionou a maior remoção de matéria orgânica (DQO) e das demais variáveis, em geral. O TRH de 72 h só não apresentou a maior média de remoção para a variável  $P_T$  e do mesmo modo apresentou-se estatisticamente igual ao tempo de 96 h para remoção de DQO e de  $N_{\text{amon}}$ , bem como ao tempo de 48 h para a remoção de  $N_{\text{amon}}$ .

**Tabela 1.5.** Valores médios de remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio), NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl),  $N_{amon}$  (Nitrogênio Amoniacal), P (Fósforo), K (Potássio) e AT (Alcalinidade Total) nos SACs, em função do TRH

TRH (h)	Redução (%)					
	DQO*	NTK*	$N_{amon}$ *	P <sub>T</sub> *	K*	AT*
24	46,5 c	29,0 c	28,5 b	43,0 b	20,6 c	17,4 c
48	54,4 b	37,1 ab	40,0 a	46,5 ab	35,9 a	25,3 b
72	67,2 a	38,3 a	37,9 a	44,6 b	36,7 a	29,9 a
96	65,7 a	34,8 b	38,0 a	50,9 a	27,7 b	29,4 a

Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey. \*1% de probabilidade.

A análise de influência do fator tempo apresentou diferenças significativas em todas as variáveis. As remoções médias de DQO dos SACs submetidos aos TRHs de 72 e 96 h (67,2 e 65,7%) foram superiores às obtidas com TRH de 48 h (54,4%) e esta foi superior à obtida com o TRH de 24 h (46,5%).

Em outro trabalho utilizando as espécies *Typha* spp. e *Eleocharis* spp. e trabalhando com tempos de reação estacionários, ou seja, no qual todo o volume de água residuária permanecia estático no sistema por um período estipulado para reação, Mazzola *et al.* (2005) observaram um comportamento parecido ao encontrado neste trabalho. Os tempos de reação de 96 e 72 h proporcionaram, em média, remoções de 73,5 e 70,5% de DQO e foram superiores aos tempos de 48 e 24 h (29,1 e 26,0% de remoção de DQO).

Freitas (2006) aplicando ARS com uma  $L_s$  de 59,1 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO, em SACs de escoamento horizontal, cultivado com *Typha latifolia*, *Alternanthera philoxeroides* e *Cynodon dactylon*, sob TRH de 115,2 h observou remoção na ordem de 89,2% de DQO, remoção esta maior que a encontrada nos SACs verticais testados neste experimento. Infere-se que esta maior remoção possa estar ligada ao maior TRH e a maior taxa de aplicação, pois segundo Kadlec e Wallace (2009) as taxas de degradação da matéria orgânica são proporcionais às taxas de aplicação, com ressalvas ao tipo e concentração de água residuária, as relações DQO:DBO:nutrientes, temperatura, microbiota etc.

No que se refere à concentração de NTK, observou-se que nos SACs operados sob o TRH de 72 h a remoção foi de 38,3%, não diferindo da obtida no de 48 h (37,1%). Tais remoções são superiores às obtidas nos SACs operados sob 96 h e 24 h, equivalentes a 34,8 e 29,0%, respectivamente.

Para a variável nitrogênio amoniacal, observou-se que sob um TRH de 24 h, a remoção observada foi estatisticamente inferior a observada nos demais SACs.

Ao analisar a influência do fator TRH sobre a nitrificação, notou-se que ela foi inversamente proporcional ao TRH, sendo que quanto menor o TRH maior a nitrificação ocorrida, obtendo-se um aumento de nitrato de 34,5, 76,0, 104,3 e 714,0% para os TRHs de 96, 72, 48 e 24 horas, respectivamente.

Infere-se que o arraste e a mistura da massa de água com o oxigênio do meio sob os menores TRHs são mais elevados devido à maior mobilidade e velocidade de esvaziamento da água, oxigenando mais o meio e auxiliando na nitrificação.

Verificou-se também que o maior consumo de alcalinidade se deu nos SACs submetidos aos TRHs de 72 e 96 h, nos quais foram obtidas as reduções de 29,9 e 29,4% na alcalinidade, seguido dos TRHs de 48 e 24 h (25,5 e 17,4% de redução de alcalinidade). Ao contrário do fator espécie vegetal, não se verificou relação direta entre o consumo de alcalinidade e a nitrificação dentro do fator TRH.

As maiores remoções médias de fósforo total foram obtidas nos tratamentos com SACs submetidos a tempos 96 e 48 h, respectivamente 50,9 e 46,5%, e não diferindo estatisticamente das obtidas no TRH de 48 h, seguida pelas obtidas nos TRHs de 72 e 24 h, com os quais foram obtidas, respectivamente, remoções de 44,6 e 43,0%.

A maior redução na turbidez ocorreu nos SACs submetidos aos TRHs de 24 e 96 h, tendo sido obtidas reduções de 35,6 e 28,2 %, e as menores ocorreram nos SACs submetidos aos TRHs de 72 e 48 h (10,3 e 2,4%).

Os TRHs de 72 e 48 h, não diferindo entre si, foram os que proporcionaram as maiores remoções de potássio, respectivamente 36,7 e 35,9%, nos demais TRHs foram obtidas remoções inferiores, ou seja, 20,6 e 9,6% respectivamente nos TRHs de 24 e 96 h.

De modo geral, dos TRHs que foram utilizados nos SACs, o TRH que obteve as melhores eficiências de remoção, foi o de 72 h podendo-se averiguar na

Tabela 1.5 que o mesmo predomina com as maiores eficiências de remoção das variáveis.

### 3.4. Análise morfológicas das espécies vegetais

Após o período de adaptação e o período experimental (106 dias), observou-se que o *Cyperus* sp. apresentou bom desenvolvimento, promovendo a maior produção de massa, de números de brotos, maior altura de planta e maior comprimento de folha. A maior remoção mássica de nutrientes observada nos SACs cultivados com *Cyperus* sp., em relação aos demais, pode estar atrelada aos fatores citados.

Na Figura 1.3 estão apresentadas as espécies que foram utilizadas neste trabalho, após o término do experimento.



**Figura 1.3.** A – *Cyperus* sp., B – *Heliconia rostrata*, C – *Hedychium coronarium*.

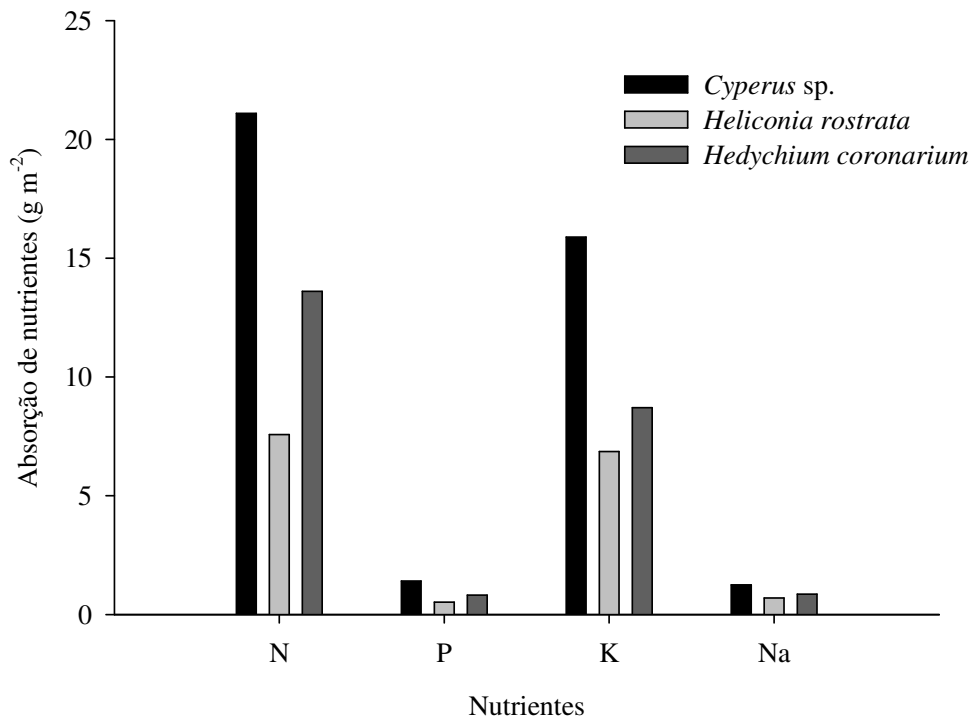
Conforme se pode verificar na Tabela 1.7, o *Cyperus* sp. foi, dentre as espécies cultivadas nos SACs, a que obteve maior produtividade e a maior absorção de nutrientes (Figuras 1.4 e 1.5), sendo a produtividade total (parte aérea + inferior) do *Cyperus* sp. de 2,6 kg m<sup>-2</sup> e a absorção de nutrientes total do mesmo de 49,4 g m<sup>-2</sup> de N, 4,4 g m<sup>-2</sup> de P, 23,7 g m<sup>-2</sup> de K e 8,6 g m<sup>-2</sup> de Na.

As absorções de nutrientes das plantas, utilizadas neste experimento, inclusive do *Cyperus* sp. (21,1 g m<sup>-2</sup> de N, 1,4 g m<sup>-2</sup> de P, 15,9 g m<sup>-2</sup> de K e 1,3 g m<sup>-2</sup> de Na) foram inferiores às reportadas por Matos *et al.* (2009a), que

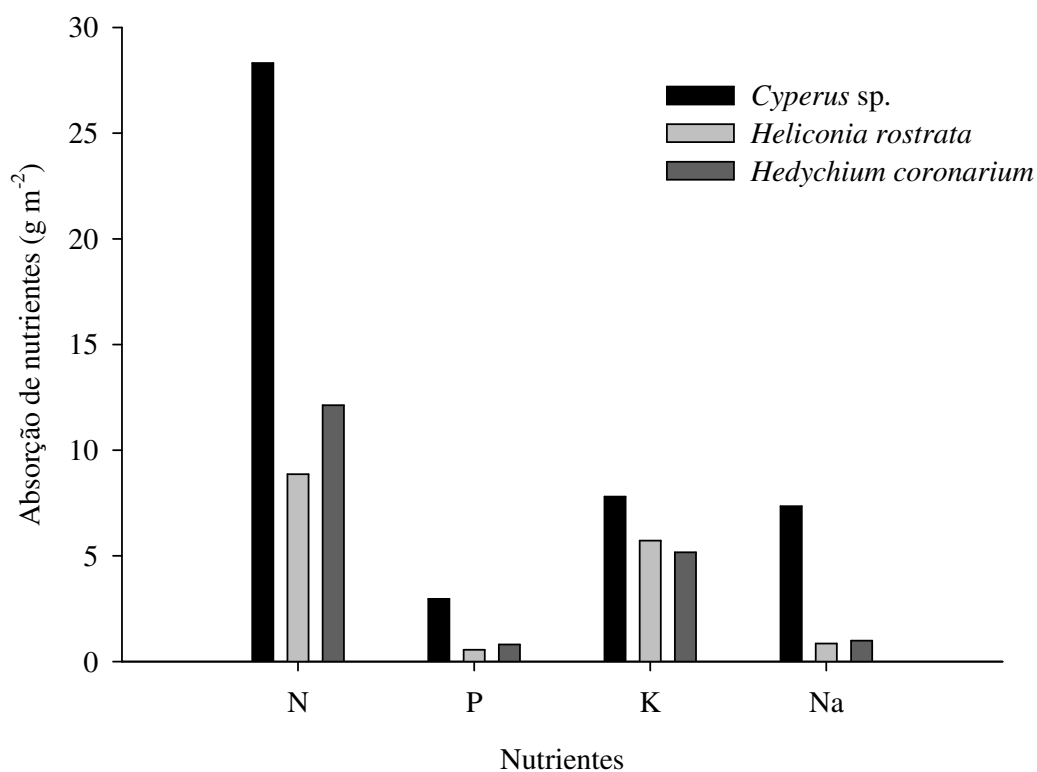
trabalharam com ARS em SACs de escoamento horizontal, considerando-se apenas a parte aérea das plantas, tendo obtido absorção média de 53,3 g m<sup>-2</sup> de N, 8,8 g m<sup>-2</sup> de P, 60,5 g m<sup>-2</sup> de K e 8,5 g m<sup>-2</sup> de Na com a *Typha latifolia*; 106,8 g m<sup>-2</sup> de N, 13,7 g m<sup>-2</sup> de P, 116,6 g m<sup>-2</sup> de K e 10,3 g m<sup>-2</sup> de Na com a *Alternanthera philoxeroides* e 68,1 g m<sup>-2</sup> de N, 10,7 g m<sup>-2</sup> de P, 59,1 g m<sup>-2</sup> de K e 0,8 g m<sup>-2</sup> de Na com o *Cynodon dactylon*.

**Tabela 1.7.** Produtividade média de matéria seca (PMS) do *Cyperus* sp., da *Heliconia rostrata* e do *Hedychium coronarium* na parte aérea, na parte inferior e total.

Espécies / PMS (kg m <sup>-2</sup> )	Aérea	Inferior	Total
<i>Cyperus</i> sp.	0,8	1,8	2,6
<i>Heliconia</i>	0,4	0,4	0,8
<i>Hedychium</i>	0,6	0,3	0,9



**Figura 1.4.** Absorção de nutrientes das espécies cultivadas nos SACs – parte aérea.



**Figura 1.5.** Absorção de nutrientes das espécies cultivadas nos SACs – parte inferior.

### 3.5. Carga mássica e aplicabilidade

Verifica-se a importância de se computar a carga mássica para analisar a eficiência de remoção em SACs. Quando se verificou a média dos SACs cultivados, a remoção de NTK foi 1,3 vez superior à média obtida nos SACs não cultivados, enquanto que se a mesma fosse analisada sem computar a remoção mássica, teria sido obtido um valor 1,2 vez maior.

Em questões relacionadas à custos e economia sobre o sistema, Jasper *et al.* (2008) chegaram a conclusão que em granjas suinícolas de manejo do dejetos na forma seca, ou seja, em que há a raspagem da parte sólida dos dejetos antes da lavagem da granja, tal qual a granja onde foi coletada a água residuária para a realização deste experimento, os SACs demandam menores áreas para o

tratamento, além dos menores custos anuais de implantação, explicitando deste modo a viabilidade e a aplicabilidade dos SACs.

Pode-se observar na literatura, em artigos e em teses que, cada vez mais, esses sistemas vêm ganhando espaço, ampliando-se o conhecimento acerca dos mesmos, estudando-se suas variações, seus pormenores, suas diferentes configurações e suas interações microbiológicas, sistemas esses em escala piloto ou até mesmo em escala plena. Sua aplicabilidade é ampla, podendo ser utilizado no esgotamento urbano, na zona rural, em atividades agroindustriais, mineração, resíduos de explosivos etc.

#### 4. CONCLUSÕES

- A influência das plantas sobre os SACs foi positiva, aumentando a eficiência de remoção, principalmente de nitrogênio, fósforo e potássio.
- Em geral, quanto maior o tempo de retenção hidráulica (TRH) imposto nos SACs maiores foram as remoções obtidas.
- A remoção mássica média de NTK nos SACs cultivados foi 33% superior à obtida nos SACs não cultivados.
- A melhor espécie cultivada nos SACs foi o *Cyperus* sp. e o melhor tempo para se operar foi TRH de 72 h, obtendo remoções mássicas de 69,1% para DQO, 56,5% para NTK, 64,3% para fósforo total e 55,0% para potássio.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J.P.E. Soil respiration. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds.). **Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties**. Madison, America Society of Agronomy, 1982. Part 2. p. 831-871.
- APHA [American Public Health Association]; AWWA [American Water Works Association]; WEF [Water Environment Federation]. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2005. 1268 p.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A. Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Typha sp.*) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12, n.3, p.266-272, 2007.
- BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**, v.35, n.5, p.11-17. 1997.
- COOPER, P.; SMITH, M.; MAYNARD, H. The design and performance of a nitrifying vertical-flow reed bed treatment system. **Water Science Technology**, v.35, n.5, p.215-221, 1997.
- FIA, R.; MATOS, A.T.; FERREIRA, P.A.; TEODORO, P.E.P.; SCHUERY, F.C.; LUIZ, F.A.R. Desempenho agrônômico da *Typha sp.* e *Aternanthera philoxeroides* Mart utilizadas no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro em sistemas alagados construídos. **Engenharia na Agricultura**, v.16, p.436-448, 2008.
- FREITAS, W.S. **Desempenho de sistemas alagados construídos, cultivados com diferentes espécies vegetais, no tratamento de águas residuárias da suinocultura**. 2006. 159f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2006.
- JASPER, S.P.; ESPERANCINI, M.S.T.; BIAGGIONI, M.A.M.; OLIVEIRA, E.L.D.; GUERRA, S.P.S. Análise de econometria de dois sistemas naturais

- de tratamento de água residuária na suinocultura. **Revista Irriga**, v.13, n.4, p.540-551. 2008.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. **Treatment Wetlands**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 1016 p.
- MACHADO, A.A.; CONCEIÇÃO, A.R. **WinStat. Sistemas de análises estatísticas para Windows**. Versão 2.11. UFPEL – Universidade Federal de Pelotas, NIA – Núcleo de Informática Aplicada, 2001.
- MARA, D. To plant or not to plant? Questions on the role of plants in constructed wetlands. In: IWA International Conference on Wetland Systems, 9.; 2004, Avignon. **Proceedings...** Avignon: IWA, 2004. p.7–11.
- MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; PEREIRA, O.G. Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*cynodon* spp.) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. **Revista Ambiente & Água**, v.3, n.1, p.43-53. 2008.
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; LO MONACO, P.A.V. Capacidade extratora de diferentes espécies vegetais cultivadas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Revista Ambiente & Água**, v.4, n.2, p.31-45, 2009a.
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; FIA, R.; MATOS, M.P. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura visando seu reuso. **Engenharia na Agricultura**, v.17, p.383-391, 2009b.
- MAZZOLA, M.; ROSTON, D.M.; VALENTIM, M.A.A. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.276-283. 2005.
- OUATTARA, J.M.P.; COULIBALY, L.; TIHO, S.; GOURENE, G. Comparison of macrofauna communities in sediments of the beds of vertical flow constructed wetlands planted with *Panicum maximum* (Jacq.) treating

- domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v.35, n.8, p.1237-1242. 2009.
- SEZERINO, P.H.; REGINATTO, V.; SANTOS, M.A.; KAYSER, K.; KUNST, S.; PHILIPPI, L.S.; SOARES, H.M. Nutrient removal from piggery effluent using vertical flow constructed wetlands in southern Brazil. **Water Science and Technology**, v.48, n.2, p.129-135. 2003.
- SILVA, F.C. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2009. 627 p.
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. **Design manual: nitrogen control**. Washington DC: United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development, EPA/625/R-93/010. 1993. 311 p.
- WINTER, K.J.; GOETZ, D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v.48, n.5, p.9-14. 2003.
- YALCUK, A.; UGURLU, A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. **Bioresource Technology**, v.100, n.9, p.2521-2526. 2009.
- ZURITA, F.; DE ANDA, J.; BELMONT, M.A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v.35, n.5, p.861-869. 2009.

## CAPÍTULO 2

### AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO VERTICAL TRATANDO ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA

#### RESUMO

Objetivou-se, com este estudo, analisar, em sistemas alagados construídos (SACs), a contribuição do *Cyperus* sp. na remoção mássica de poluentes contidos nas águas residuárias de atividade suinícola (ARS). Monitorou-se, durante 90 dias, em casa de vegetação, SACs em escala piloto, localizados na área experimental do CRRH/DEA/UFV, em Viçosa, MG, sendo as seguintes variáveis estudadas: demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), fósforo total ( $\text{P}_T$ ), sólidos totais (ST), sólidos suspensos (SST), sólidos dissolvidos (SDT), alcalinidade total (AT), turbidez, condutividade elétrica (CE), potencial de oxirredução (Eh) e potencial hidrogeniônico (pH). Os dois SACs de escoamento vertical, foram operados em paralelo, com um tempo de retenção hidráulica (TRH) equivalente a 72 h. Um SAC foi cultivado com *Cyperus* sp., enquanto um sistema controle foi mantido sem vegetação. As diferenças significativas observadas, quando comparados os sistemas, foram para as variáveis NTK (teste t,  $P < 0,001$ ),  $\text{P}_T$  (teste Mann-Whitney,  $P = 0,056$ ), AT (teste t,  $P = 0,002$ ) e CE (teste Mann-Whitney,  $P = 0,031$ ), com as respectivas remoções médias nos SACs, cultivado e não cultivado, de 37,5 e 28,5%, 55,9 e 44,4%, 30,2 e 25,6% e 26,1 e 22,9%. Não foram verificadas diferenças estatísticas no desempenho dos SACs em relação às demais variáveis estudadas. O *Cyperus* sp. apresentou produtividade, em termos de matéria seca, de  $674,5 \text{ g m}^{-2}$ , ou seja,  $7,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , com absorção de nutrientes de 21,8; 2,1; 14,0 e 0,9  $\text{g m}^{-2}$  de N, P, K e Na, respectivamente. A evapotranspiração ( $2,7 \text{ mm d}^{-1}$ ) foi estatisticamente superior (teste Mann-Whitney,  $P < 0,001$ ) no SAC cultivado e teve papel fundamental na contabilização da remoção mássica das variáveis analisadas. O cultivo de plantas

em SACs mostrou-se importante para que se possa obter maiores remoções de nutrientes da ARS.

**PALAVRAS-CHAVE:** efluentes agroindustriais, alagados construídos, macrófitas, nutrientes

## EVALUATION OF VERTICAL-FLOW CONSTRUCTED WETLANDS IN SWINE WASTEWATER TREATMENT

### ABSTRACT

This work aimed at evaluating, in constructed wetlands (CWs), the *Cyperus* sp. contribution to mass removal of pollutants in swine wastewater. Pilot scale CWs were monitored for 90 days in a greenhouse, located in the experimental area CRRH/DEA/UFV, Viçosa, MG, Brazil, by measuring the following parameters: pH, electrical conductivity, redox potential, turbidity, alkalinity, COD, BOD, TKN, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, TP, and solids. Two vertical-flow CWs were operated, one planted with *Cyperus* sp. and the other unplanted, with 72 hours hydraulic retention time (HRT). There was no statistical difference in removal efficiency between planted and unplanted CWs, for almost all variables, the only significant differences were observed for the variables TKN (t test, P < 0.001), TP (Mann-Whitney test, P = 0.056), alkalinity (test t, P = 0.002) and EC (Mann-Whitney test, P = 0.031), with average removals of 37.5 and 28.5%, 55.9 and 44.4%, 30.2 and 25.6 and 26.1% and 22.9% for planted and unplanted CWS, respectively. The *Cyperus* sp. presented a dry matter productivity of 674.5 g m<sup>-2</sup>, with a dry matter yield of 7.5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, and the nutrient uptake was 21.8; 2.1; 14.0 and 0.9 g m<sup>-2</sup> of N, P, K and Na, respectively. Evapotranspiration (2.7 mm d<sup>-1</sup>) was statistically higher (Mann-Whitney test, P < 0.001) in the planted CW, and was fundamental in accounting for the removal of mass of all variables. The plants in the CWs are important to achieve a higher removal of nutrients.

**KEYWORDS:** agroindustry effluents, constructed wetlands, macrophytes, nutrients

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de sistemas alagados construídos (SACs) para o tratamento de águas residuárias é potencialmente uma boa solução para tratar efluentes domésticos, industriais e agrícolas, principalmente em países de clima tropical. Os SACs se baseiam em processos naturais que utilizam o sistema planta/meio suporte/micro-organismos e apresentam ótima relação custo-eficiência e boa estabilidade operacional. Devido à sua facilidade de construção e operação se configuram em uma ótima opção para países em desenvolvimento.

Com boa eficiência na remoção de matéria orgânica (DQO e DBO), sólidos, matéria orgânica e nutrientes (Brasil *et al.*, 2005; Fia *et al.*, 2008; Konnerup *et al.*, 2009), verifica-se como uma das potenciais utilizações desse sistema, o tratamento de águas residuárias nas zonas rurais, tanto para o esgoto doméstico quanto para as águas residuárias geradas na lavagem de baias, abatedouros, agroindústrias e confinamentos de animais, que são atualmente, despejadas diretamente em corpos hídricos ou no solo.

A aplicabilidade de SACs de escoamento horizontal tem sido relatada com frequência em estudos realizados em países de clima temperado (Vymazal e Kröpfelová, 2005; Langergraber, 2007; Nivala *et al.*, 2007) e também em países de clima tropical (Brasil *et al.*, 2005; Fia *et al.*, 2008; Matos *et al.*, 2008; Konnerup *et al.*, 2009; Matos *et al.*, 2009a). Recentemente, iniciativas de pesquisas contemplando os sistemas de escoamento vertical também tem sido registradas, tendo como objetivo principal a remoção de nitrogênio e de complementação da remoção de matéria orgânica nos sistemas chamados híbridos ou conjugados.

O interesse pelo estudo dos processos que ocorrem em SACs de escoamento vertical pode ser considerado recente (Kantawanichkul *et al.*, 2001; Sezerino *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2003; Mazzola *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2009). As investigações geralmente partem da premissa de que esse tipo de sistema tenha maior capacidade de nitrificação, auxiliando, assim, o processo de remoção de nitrogênio total, pelo processo nitrificação-desnitrificação biológica (Ye e Li, 2009). Há de se ressaltar, no entanto, a observação feita por

Kadlec e Wallace (2009), que alertam para a possibilidade de reduzidas taxas de desnitrificação, o que acarretaria em uma limitada remoção de nitrogênio total.

Dessa maneira, a influência da presença/ausência de plantas em SACs vem sendo analisada a fim de verificar se a capacidade de aeração do sistema radicular de algumas espécies de plantas pode contribuir, significativamente, para a nitrificação da água residuária.

Diante do exposto, o estudo foi realizado com objetivos de se avaliar a contribuição da planta na remoção de poluentes, com ênfase aos macronutrientes; a absorção de nutrientes pelas plantas; verificar se a influência da evapotranspiração nos sistemas cultivados é significativa na remoção mássica dos nutrientes; e, com base nas análises citadas anteriormente, comparar o desempenho de SACs cultivados e SACs não cultivados.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Conduziu-se o experimento em casa de vegetação, localizada na área experimental do Centro de Referência em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, situada na cidade de Viçosa, Minas Gerais (latitude 20°45'14" S, longitude 42°52'53" W, altitude média de 650 m e clima Cwa, segundo a classificação de Köppen).

Os SACs foram constituídos por recipientes metálicos, cilíndricos, cada um com dimensões aproximadas de 30 cm de altura, sendo 25 cm preenchidos com brita “zero” (diâmetro  $D_{60} = 7,0$  mm, coeficiente de uniformidade  $D_{60}/D_{10}$  de 1,6 e volume de vazios de  $0,491 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e 60 cm de diâmetro, e foram utilizados no tratamento de água residuária de suinocultura (ARS).

Dois tratamentos foram estudados ao longo do tempo: (i) SAC constituído de *Cyperus* sp. (tiriricão) cultivado em brita “zero” e (ii) SAC não cultivado, contendo apenas o substrato (brita “zero”).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) utilizado na operação dos SACs foi de 72 h, sendo que este TRH corresponde ao tempo desde a abertura do registro de carregamento de ARS até o esvaziamento completo do SAC. O carregamento orgânico superficial médio aplicado foi de  $17 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO, valor próximo

aos  $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sugeridos preliminarmente nos estudos com esse tipo de sistema (Winter e Goetz, 2003).

Os tratamentos foram baseados em experimento anteriormente realizado (Capítulo 1) onde, analisando o efeito de espécies cultivadas e do TRH, concluiu-se que o SAC cultivado com *Cyperus* sp. sob o TRH de 72 h foi o que apresentou a melhor eficiência na remoção de nutrientes da ARS, quando comparado com SACs cultivados com as espécies *Heliconia rostrata*, *Hedychium coronarium*, além de uma testemunha (SAC sem plantas), sob os TRHs de 24, 48, 72 e 96 horas.

Lavou-se os SACs utilizados no experimento anterior, passando-se água de abastecimento diversas vezes pelo sistema, continuamente, até que o efluente se apresentasse claro e com aspecto límpido, efetuou-se o corte das plantas. Posteriormente a aplicação de ARS foi iniciada. Para o controle do desenvolvimento do *Cyperus* sp., em outro SAC que também foi submetido ao tratamento supracitado, realizou-se o corte das plantas e neste apenas água de abastecimento foi aplicada, simulando-se as condições ambientais do habitat de onde o *Cyperus* sp. foi coletado.

Durante um período de experimentação de 90 dias (de agosto a novembro), o seguinte procedimento foi realizado: os sistemas eram alimentados com  $18 \text{ dm}^3$  de ARS e após o preenchimento dos SACs, abriam-se os registros de descarga. Assim, a ARS era, então, drenada durante 72 h para recipientes de coleta, sendo este, o tempo de retenção (TRH). Após a drenagem, era imediatamente aplicado novo volume de ARS, sendo que os SACs constituíam-se, dessa maneira, de sistemas de bateladas sucessivas, sem intervalos entre uma aplicação e outra.

A ARS foi coletada no tanque de armazenamento de ARS da UFV, localizada próximo à Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem da mesma universidade, sendo esta ARS constituída, preponderantemente, de urina e água de lavagem das baias de criação da suinocultura.

As concentrações afluentes e efluentes (brutas) das variáveis demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), fósforo total (PT), turbidez (TU), potencial hidrogeniônico (pH), potencial de oxi-redução ( $E_h$ ), condutividade

elétrica (CE), alcalinidade total (AT) e sólidos, foram determinadas, a fim de se analisar o comportamento dessas variáveis ao longo do tempo.

Para poder obter o valor real de redução mássica nas variáveis analisadas, a cada ciclo era também registrado a evapotranspiração de cada SAC, fazendo-se a compensação da concentração no efluente coletado, para o volume inicial.

Todas as análises foram realizadas nos laboratórios de Qualidade da Água e de Química dos Resíduos do DEA/CCA/UFV, conforme preconizado no *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 2005). Os métodos utilizados para determinação das variáveis estão apresentados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1.** Métodos utilizados na determinação das variáveis

<b>Variável</b>	<b>Método/Aparelho</b>
Demanda Química de Oxigênio	Oxidação química em refluxo aberto
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Incubação por 5 dias, a 20°C
Nitrogênio Total Kjeldahl	Processo semimicro Kjeldahl
Nitrato	Espectrofotometria
Fósforo total	Espectrofotometria
Potássio	Fotometria de chama
Turbidez	Turbidímetro
Potencial Hidrogeniônico	Peagâmetro
Potencial de Oxi-redução	Potenciômetro
Condutividade Elétrica	Condutivímetro
Alcalinidade Total	Titrimétrico
Sólidos	Gravimétrico

Para as análises nutricionais, as partes aérea e inferior (rizomas e raízes) das plantas foram secas em estufa com recirculação de ar, sob temperatura de 65 °C, por 3 dias, e posterior trituração em moinho tipo Wiley, de acordo com as recomendações de Silva (2009).

Com base na análise nutricional da planta, realizou-se o cálculo da taxa de absorção de nutrientes pela mesma, sendo que a absorção é a concentração do nutriente multiplicada pela produção de massa da parte em questão a ser analisada (aérea ou inferior), e esta absorção dividida pela área, resulta na taxa de absorção de nutrientes. Podendo-se obter a taxa de absorção de nutrientes diária, através da divisão da taxa de absorção pelo número de dias de desenvolvimento da planta.

Para analisar a diferença entre as médias dos tratamentos (repetições independentes), os resultados obtidos na experimentação realizada foram, primeiramente, analisados por meio de análise de normalidade (teste de Kolmogorov-Smirnov) e de homogeneidade de variância (teste de Levene). Nas variáveis em que as médias apresentaram normalidade e homogeneidade aplicou-se o teste t; já para as variáveis que não apresentaram normalidade e, ou, homogeneidade, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se aplicativo estatístico SigmaPlot 11.0.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Eficiência dos SACs na remoção de poluentes da ARS**

Os dados das análises da ARS aplicada e dos efluentes dos SACs, bem como a eficiência na remoção dos poluentes da ARS podem ser visualizados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2.** Concentração dos poluentes e eficiências de remoção no SAC com brita e no SAC cultivado com *Cyperus* sp. (tiriricão). Média  $\pm$  Erro Padrão.

	ARS	SAC BRI	SAC TIR
<b>ST (g m<sup>-3</sup>)<sup>b</sup></b>	1487,9 $\pm$ 43,1	1037,3 $\pm$ 18,8	994,0 $\pm$ 24,1
<b>Remoção de ST (%)</b>		30,0 $\pm$ 1,4	33,1 $\pm$ 0,7
<b>SST (g m<sup>-3</sup>)<sup>b</sup></b>	329,6 $\pm$ 32,6	53,7 $\pm$ 7,7	55,2 $\pm$ 6,8
<b>Remoção de SST (%)</b>		81,6 $\pm$ 3,2	82,1 $\pm$ 3,0
<b>SDT (g m<sup>-3</sup>)<sup>b</sup></b>	1158,3 $\pm$ 30,6	983,6 $\pm$ 21,7	938,8 $\pm$ 21,8
<b>Remoção de SDT (%)</b>		14,6 $\pm$ 2,6	18,7 $\pm$ 1,8
<b>DQO (g m<sup>-3</sup>)<sup>a</sup></b>	799,5 $\pm$ 50,7	258,6 $\pm$ 15,4	247,1 $\pm$ 15,8
<b>Remoção de DQO (%)</b>		66,1 $\pm$ 1,7	67,7 $\pm$ 1,7
<b>DBO (g m<sup>-3</sup>)<sup>c</sup></b>	163,0 $\pm$ 11,1	44,9 $\pm$ 10,1	48,6 $\pm$ 13,4
<b>Remoção de DBO (%)</b>		73,5 $\pm$ 4,1	72,3 $\pm$ 5,2
<b>NTK (g m<sup>-3</sup>)<sup>a</sup></b>	395,2 $\pm$ 8,1	303,0 $\pm$ 7,4	283,1 $\pm$ 6,7
<b>Remoção de NTK (%)</b>		28,5 $\pm$ 1,4	37,5 $\pm$ 1,1 <sup>*</sup>
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (g m<sup>-3</sup>)<sup>a</sup></b>	0,7 $\pm$ 0,05	0,3 $\pm$ 0,02	0,3 $\pm$ 0,02
<b>Remoção de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (%)</b>		50,4 $\pm$ 5,1	49,0 $\pm$ 6,3
<b>P<sub>T</sub> (g m<sup>-3</sup>)<sup>d</sup></b>	62,6 $\pm$ 3,4	34,3 $\pm$ 3,4	26,7 $\pm$ 2,1
<b>Remoção de P<sub>T</sub> (%)</b>		44,4 $\pm$ 3,1	55,9 $\pm$ 4,6 <sup>**</sup>
<b>AT (g m<sup>-3</sup>)<sup>a</sup></b>	1643,8 $\pm$ 27,6	1221,0 $\pm$ 22,1	1146,4 $\pm$ 22,8
<b>Remoção de AT (%)</b>		25,6 $\pm$ 1,0	30,2 $\pm$ 0,9 <sup>*</sup>
<b>Turbidez (UNT)<sup>a</sup></b>	68,4 $\pm$ 2,1	18,6 $\pm$ 1,1	19,8 $\pm$ 1,3
<b>Remoção de Turbidez (%)</b>		71,5 $\pm$ 2,5	69,4 $\pm$ 2,8
<b>CE (<math>\mu</math>S cm<sup>-1</sup>)<sup>a</sup></b>	3543,6 $\pm$ 59,9	2725,7 $\pm$ 48,6	2611,4 $\pm$ 63,5
<b>Remoção de CE (%)</b>		22,9 $\pm$ 1,2	26,1 $\pm$ 1,6 <sup>***</sup>
<b>Eh (mV)<sup>a</sup></b>	-395,1 $\pm$ 10,3	-140,7 $\pm$ 7,9	-135,0 $\pm$ 8,0
<b>pH<sup>a</sup></b>	7,5 $\pm$ 0,02	8,0 $\pm$ 0,02	8,0 $\pm$ 0,02

<sup>\*</sup> Diferença estatística entre médias da mesma linha. (teste t, P < 0,01)

<sup>\*\*</sup> Diferença estatística entre médias da mesma linha. (teste t, P < 0,10)

<sup>\*\*\*</sup> Diferença estatística entre médias da mesma linha. (teste Mann-Whitney, P < 0,05)

<sup>a</sup> 27 amostragens, <sup>b</sup> 10 amostragens, <sup>c</sup> 9 amostragens, <sup>d</sup> 8 amostragens

Conforme pode se observar, as variáveis em que as remoções foram estatisticamente superiores no SAC cultivado foram o Nitrogênio Total Kjeldahl (teste t, P < 0,001), a Alcalinidade Total (teste t, P = 0,002), a Condutividade Elétrica (teste Mann-Whitney, P = 0,031) e o Fósforo Total (teste t, P = 0,056).

### 3.1.1. Sólidos

#### *Sólidos Totais*

Sob uma taxa de aplicação superficial ( $L_S$ ) de  $31,6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de ST, a remoção máxima para ambos os sistemas foi de 36,0%, com remoções médias de 33,1 e 30,0% para o SAC cultivado e não cultivado, respectivamente. Oliveira *et al.* (2007) em SACs de escoamento subsuperficial horizontal, cultivados com Tangola (*Brachiaria radicans x Brachiaria mutica*), sob uma taxa de aplicação de  $225,6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de ST, obtiveram remoções de 22,9% na concentração de sólidos totais e em SACs não cultivados de 13,0%. Matos *et al.* (2009b), tratando ARS em SACs de escoamento subsuperficial horizontal, aplicando uma taxa de  $68,8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de ST, observaram remoção média de 60,3% dos sólidos totais em SACs cultivados com *Cynodon dactylon*, *Alternanthera philoxeroides* e *Typha latifolia*.

#### *Sólidos Suspensos Totais*

Com remoções médias observadas de 82,1 e 81,6% no SAC cultivado e não cultivado, respectivamente, estes não diferiram entre si estatisticamente. Observaram-se remoções máximas de 95,0% no SAC cultivado e de 93,8% no SAC não cultivado, sob a  $L_S$  média de  $7,0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de SST. Para o mesmo tipo de água residuária, Kantawanichkul *et al.* (2001), sob  $L_S$  de  $37,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de SST, observaram remoção de 97%, enquanto Sun *et al.* (2005), com uma  $L_S$  de  $186,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de SST, verificaram remoção média de 56,8%. Kadlec e Wallace (2009) citam que os principais mecanismos de remoção de sólidos suspensos em SACs são a interceptação e a sedimentação, correlacionando, assim, as menores remoções observadas com as maiores granulometrias no meio suporte, pois estas dispõem de menos obstáculos para interceptar os sólidos.

Brix e Arias (2005) tratando esgoto doméstico e águas cinzas em SACs sob uma  $L_S$  aproximada de  $4,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de SST, verificaram uma remoção média de 94% para sólidos suspensos em seu experimento, em SACs de escoamento vertical em que se utilizou areia como meio suporte. Gross *et al.* (2007)

verificaram remoções de 98% de sólidos suspensos em experimento de SACs de escoamento vertical com recirculação, tratando águas cinzas, sob uma  $L_S$  de 26,2  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  de SST, cultivados com *Lactuca sativa*, utilizando como meio suporte camadas de solo orgânico, meio plástico de elevada superfície e seixos de calcário.

#### *Sólidos Dissolvidos Totais*

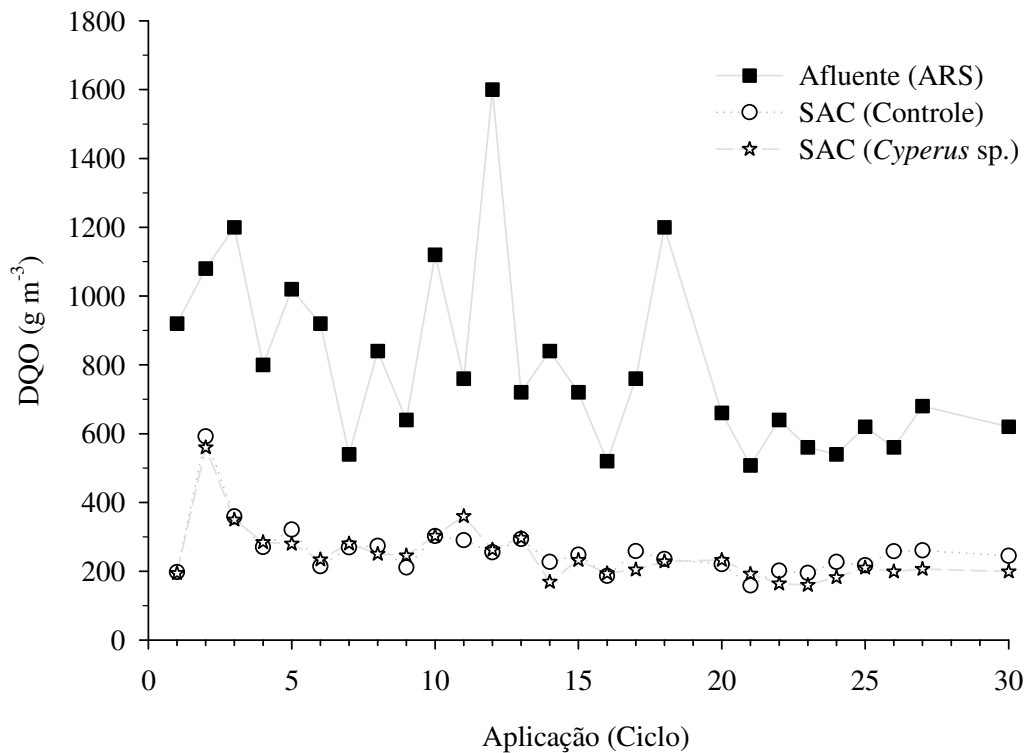
Observaram-se remoções médias relativamente baixas tanto no SAC cultivado, de 18,7%, como no não cultivado, de 14,6%, aplicando-se uma  $L_S$  de 24,6  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  de SDT. Matos *et al.* (2009b), tratando ARS em SACs de escoamento subsuperficial horizontal, sob  $L_S$  de 31,9  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  de SDT, observaram remoção média de sólidos dissolvidos de 48,0% para SACs cultivados com *Cynodon dactylon*, 33,0% com *Alternanthera philoxeroides*, 21,0% com *Typha latifolia* e 40,0% com SAC não cultivado. De modo contrário, Oliveira *et al.* (2007), em SACs de escoamento subsuperficial horizontal, cultivados com Tangola (*Brachiaria radicans* x *Brachiaria mutica*), tratando esgoto doméstico efluente de UASB, sob uma  $L_S$  de 128,4  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  de SDT, observaram elevações de até 19,5% na concentração de sólidos dissolvidos e em SACs não cultivados de 27,0%.

### 3.1.2. Matéria Orgânica

#### *Demanda Química de Oxigênio*

As maiores remoções de DQO observadas foram de 84,1% no SAC não cultivado e de 83,6% no SAC cultivado e as menores remoções foram de 45,2 e 48,1% nos SACs não cultivado e cultivado, respectivamente, sendo a  $L_S$  média de 17,0  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  de DQO. Com remoções médias de 67,7 e 66,1% para a variável DQO, respectivamente nos SACs cultivado e não cultivado, verificou-se não haver diferença estatística entre elas. Valores similares foram verificados por Zhao *et al.* (2009) cultivando *Lythrum salicaria* em SACs de escoamento vertical, com remoção média de DQO de 63,6%, tratando esgoto doméstico, sob  $L_S$  de 14,6  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  de DQO.

Pode-se observar na Figura 2.1 que apenas no início do experimento os valores de concentração de DQO na saída do sistema apresentaram um pico próximo aos 600  $\text{g m}^{-3}$  e no restante do experimento houve estabilização na concentração de saída do sistema, apresentando-se indiferente a concentração de entrada. Ambos os tratamentos, controle e cultivado, apresentaram concentrações efluentes semelhantes.



**Figura 2.1.** DQO afluente e efluente dos SACs durante o experimento.

Prochaska *et al.* (2007) verificaram maiores remoções de DQO (97,8%) nos SACs de escoamento vertical cultivados com *Phragmites australis*, testando como meio suporte areia e areia/dolomita (10/1), sob  $L_S$  de  $25,9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO, tratando esgoto sintético.

SACs de escoamento vertical tratando ARS ( $L_S$  de  $105,0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO) cultivados com *Cyperus flabelliformis* foram estudados por Kantawanichkul *et al.* (2001), verificando remoções médias de DQO de 97,0%. Atribui-se esta remoção superior com a altura de 0,8 m de meio suporte, bem como o material utilizado (areia). Outro fator que pode ter contribuído para essa maior remoção é o fato do sistema funcionar intermitentemente: 4 h com ARS e 4 h vazio, condicionando, assim, uma maior oxigenação no sistema.

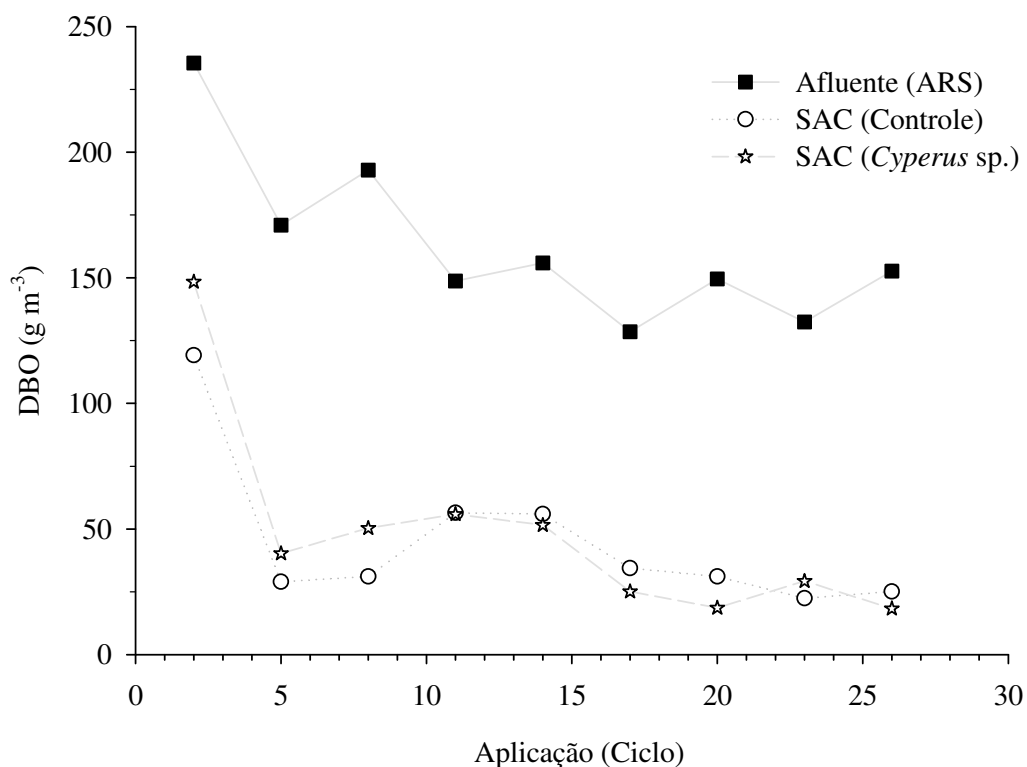
Inferese-se que a maior profundidade em SACs de escoamento vertical pode levar a maiores remoções de matéria orgânica particulada. Já em relação ao material usado como suporte, percebe-se que a filtração será mais efetiva, e

consequentemente uma maior remoção de matéria orgânica particulada será observada em sistemas com substratos de menor granulometria.

Remoções inferiores (51,0%) foram verificadas por Aslam *et al.* (2007), no entanto, os valores observados estão correlacionados aos reduzidos valores de DQO na entrada do sistema ( $256 \text{ g m}^{-3}$ ), sabe-se: que as taxas de degradação de matéria orgânica são reduzidas em situações onde o carregamento é pequeno (Kadlec e Wallace, 2009).

### *Demanda Bioquímica de Oxigênio*

Na Figura 2.2 são visualizados os dados de entrada (afluente) e saída (efluente) nos sistemas, no que tange à DBO. Os valores relativamente reduzidos de DBO observados na ARS aplicada nos SACs, que operaram sob  $L_S$  média de  $3,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO, são ocasionados pelo tipo de manejo da granja. O sistema de manejo é na forma seca, no qual primeiramente se efetua a raspagem do material sólido e depois faz a lavagem das baias. Essa forma de manejo torna a ARS rica em nutrientes devido à urina dos animais e pobres em matéria orgânica, já que apenas pequenas quantidades de restos de dejetos residuais da raspagem constituem a ARS. Ambos os tratamentos, controle e plantado, apresentaram concentrações efluentes semelhantes.



**Figura 2.1.** DBO afluente e efluente dos SACs durante o experimento.

Em relação à variável DBO, as remoções médias observadas foram de 73,5 e 72,3% no SAC não cultivado e cultivado, respectivamente. Igualmente à variável DQO, não houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos. Os valores observados de eficiência na remoção de poluentes de ambos os tratamentos, ficam dentro da faixa encontrada na literatura para SACs de escoamento vertical (Klomjek e Nitisoravut, 2005; Zurita *et al.*, 2009).

A maior remoção verificada no SAC cultivado foi de 88,0% e no não cultivado foi de 83,9%. Sun *et al.* (2005), estudando o tratamento de ARS em SACs de escoamento vertical em série, sob  $L_S$  igual a  $906,0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO, verificaram remoções médias de DBO de 57,4%. Brix e Arias (2005) observaram remoção média de 94,5% para SACs de escoamento vertical, tratando águas cinzas e esgoto doméstico, cultivados com *Phragmites australis*, sob  $L_S$  média de  $18,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO. Aslam *et al.* (2007) observaram remoções médias de

51,0% em SACs de escoamento vertical, cultivados com *Phragmites karka*, tratando água residuária de refinaria, com  $L_S$  de  $13,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO .

Possivelmente os SACs cultivados apresentam maiores quantidades e variedades de micro-organismos, possibilitando mais fácil degradação do conteúdo orgânico e, conseqüentemente, remoção de DBO. Porém ocorre, simultaneamente, a depleção de oxigênio pela respiração endógena dos micro-organismos, contribuindo para que não haja diferença significativa na remoção de DBO entre SACs cultivados ou não.

### 3.1.3. Macronutrientes

#### *Nitrogênio Total Kjeldahl*

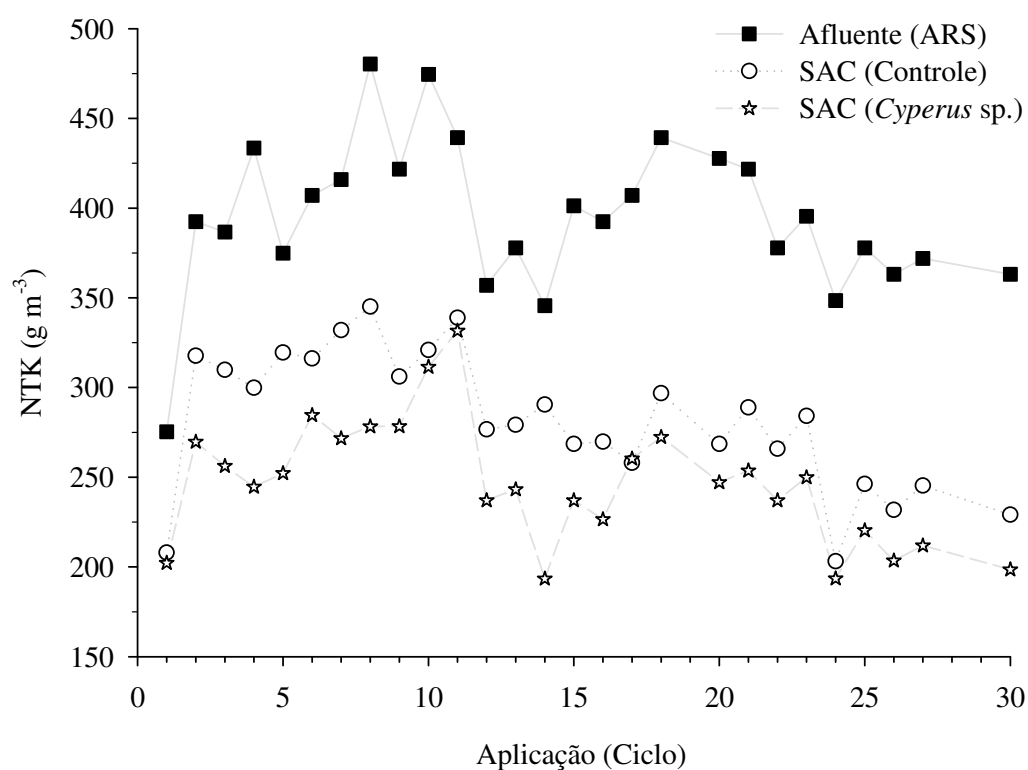
No SAC cultivado, observou-se a remoção máxima de 45,3% no NTK, verificando remoção média de 37,5%, que se apresentou estatisticamente superior (teste t,  $P < 0,001$ ) à obtida no SAC não cultivado, com remoção máxima de 41,7% e média de 28,5%. Ressalta-se que, no presente estudo, os SACs operaram sob uma  $L_S$  equivalente a  $8,4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de NTK.

Kantawanichkul *et al.* (2001) tratando ARS em SACs de escoamento vertical, observaram remoções médias de 97% de NTK, sendo que os sistemas estudados operavam sob taxas semelhantes às do presente estudo. Infere-se que esta elevada remoção possa estar ligada a maior absorção de N pela planta (*Cyperus flabelliformis*), na ordem de  $1,1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , contra a observada para o *Cyperus* sp. no presente experimento, de  $0,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , bem como a elevada nitrificação verificada pelos autores, que na conversão de NTK em nitrato, acaba por reduzir a concentração do mesmo.

Torrens *et al.* (2009), tratando efluente de lagoa de estabilização, aplicando taxas de 2,8 a  $12,0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de NTK, também verificaram remoções maiores (74,5 e 73,0%, respectivamente nos SACs escoamento vertical, cultivado e não cultivado). Com valores de remoção de nitrogênio total próximos aos observados neste trabalho, Brix e Arias (2005) observaram uma remoção média

de 43,8% de NTK nos SACs de escoamento vertical utilizados para tratar águas cinzas, sob  $L_S$  média de  $6,8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de NTK.

Na Figura 2.3 pode-se observar a tendência de acompanhamento das concentrações efluentes com a concentração afluente, porém verifica-se um afastamento inferior da linha de concentração do SAC cultivado com *Cyperus sp.*, evidenciando a maior remoção do mesmo.



**Figura 2.3.** NTK afluente e efluente dos SACs durante o experimento.

### Nitrato

Com uma  $L_S$  de  $14,8 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $\text{N-NO}_3^-$ , verificou-se não haver nitrificação em ambos os sistemas, cultivado e não cultivado, com remoção média de 49,0% no SAC cultivado e de 50,4% no não cultivado. Conforme se pode verificar na Tabela 2.1, apesar de ter havido aumento no potencial redox e consumo de alcalinidade que indicariam nitrificação, não houve elevação suficiente do potencial redox para se atingir a condição aeróbia, e sim elevando

até uma condição limítrofe entre a anaeróbia e a anóxica que, como citado por Zurita *et al.* (2009), permite a desnitrificação.

Em SACs verticais em série, tratando ARS, sob  $L_S$  de  $1,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $\text{N-NO}_3^-$ , Sun *et al.* (2005) observaram remoção média de 25% de nitrato e, em SAC similar com recirculação do efluente, houve nitrificação, ou seja, se elevaram os níveis de nitrato, havendo uma elevação média de 164,7%. Maiores níveis de elevação de nitrato foram observados por Kantawanichkul *et al.* (2001), com concentração afluente de  $0,27 \text{ g m}^{-3}$  e atingindo uma concentração efluente de  $72,8 \text{ g m}^{-3}$ .

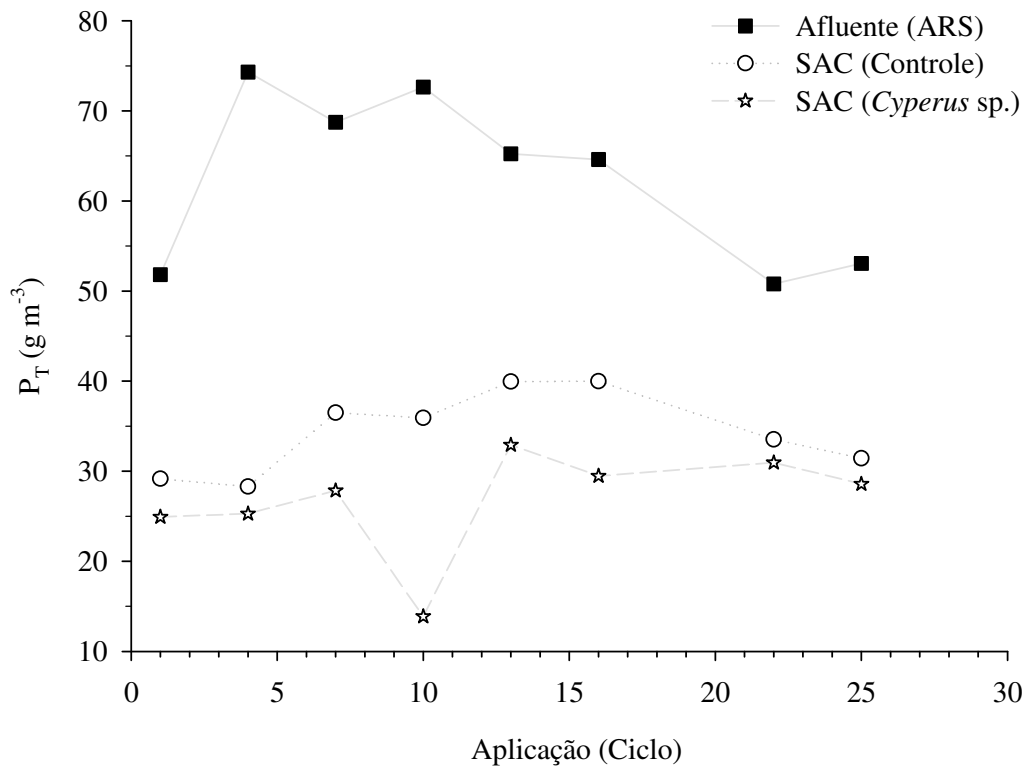
Matos *et al.* (2009b) estudando SACs de escoamento horizontal, cultivados com *Cynodon dactylon*, *Alternanthera philoxeroides* e *Typha latifolia*, observaram uma elevação da concentração de nitrato em 66,7%, acredita-se que esta nitrificação seja devida a alta capacidade de oxigenação da *Typha latifolia*.

Verifica-se, geralmente, que a nitrificação em SACs verticais, como nos citados anteriormente, é decorrente de sistemas com recirculação que aumentam a movimentação da massa de água, ocasionando maiores trocas gasosas com o meio, e também em sistemas em que as aplicações são intermitentes e com intervalos, com baixos TRHs.

### *Fósforo Total*

As maiores remoções observadas foram de 80,9% no SAC cultivado e de 61,9% no SAC não cultivado e as menores remoções foram 34,0 e 39,1% nos SACs não cultivado e cultivado, respectivamente. Com remoções médias de 55,9 e 44,4% nos SACs cultivado e não cultivado, respectivamente, houve diferença estatística entre eles (teste t,  $P = 0,056$ ).

Na Figura 2.4 pode-se visualizar o afastamento da linha efluente do SAC cultivado com o SAC não cultivado, indicando a maior remoção de fósforo no SAC cultivado.



**Figura 2.4.**  $P_T$  afluente e efluente dos SACs durante os dias de experimento.

Os valores médios de remoção observados neste experimento, sob  $L_S$  de  $1,3\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$  de  $P_T$ , foram superiores aos encontrados na literatura para remoção de fósforo em SACs de escoamento vertical. Klomjek e Nitisoravut (2005) observaram 36,5% de remoção média nos SACs de escoamento vertical cultivados e 31,4% para não cultivados, SACs estes tratando esgoto doméstico, sob  $L_S$  de  $0,2\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ . Brix e Arias (2005) também observaram baixas remoções de fósforo, entre 20,0 e 30,0% tratando esgoto doméstico, esgoto doméstico com recirculação e água cinzenta, aplicando-se uma  $L_S$  média de  $0,6\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$  de  $P_T$ .

### 3.1.4. Outras variáveis

#### *Potencial de Oxidação e Redução*

De acordo com o esperado, observou-se que o potencial redox médio da ARS afluyente (-395,2 mV) permaneceu sempre em faixa anaeróbia (meio redutor). Em ambos os tratamentos não houve elevação do potencial a níveis significativos, permanecendo os mesmos em condição anaeróbia, situando-se próximo a condição anóxica, com valores médios de -140,7 mV para o SAC não cultivado e de -135,0 mV para o SAC cultivado.

Zhao *et al.* (2009) testando relações diferentes de carbono/nitrogênio em águas residuárias sintéticas de cargas baixas, médias e altas, sob  $L_S$  média de 14,6  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$  de DQO, não verificaram alterações significativas no potencial redox de entrada (64,4 mV) e saída (47,2 mV) dos SACs. Yu *et al.* (2007) relatam que um fator crítico para que haja nitrificação seria o potencial redox acima de 500 mV.

Faulwetter *et al.* (2009) citam haver um gradiente de 500 mV à -250 mV, de uma fina camada no entorno das raízes à uma distância de 1-20 mm da superfície da raiz, comprovando-se assim a oxigenação fornecida pela planta ao sistema. Os autores ressaltam que em sistemas que tratem água residuária com elevado conteúdo de matéria orgânica, dificilmente as plantas conseguiriam fornecer oxigênio, suficiente, para suprir as suas demandas (o necessário para a remoção de DQO, DBO etc.), e ainda ter de converter o nitrogênio amoniacal em nitrato.

A espécie vegetal cultivada pode influenciar sobremaneira a condição redox nos SACs. Matos *et al.* (2010), por exemplo, observaram que SACs de escoamento horizontal cultivados com *Typha* sp. apresentam tendência de oxigenação mais rápida quando comparados a sistemas cultivados com *Alternanthera philoxeroides* e *Cynodon dactylon*.

### *Alcalinidade Total*

As maiores remoções observadas de alcalinidade total foram de 37,9% no SAC cultivado e de 36,1% no SAC não cultivado, com remoções médias de 30,2 e 25,6%, respectivamente, com  $L_S$  média de 34,9 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de alcalinidade, tendo sido observada diferença estatística entre as médias dos tratamentos (teste t, P = 0,002). Kantawanichkul *et al.* (2001), tratando ARS, com  $L_S$  de 29,9 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de alcalinidade, relatam a redução de alcalinidade em SACs de escoamento vertical de 93,8%, os mesmos autores afirmam que esta redução é devida a elevada nitrificação observada no sistema. A redução da alcalinidade pode ser correlacionada com a nitrificação e também com a formação de precipitados, e verificou-se neste trabalho uma pequena remoção de alcalinidade, podendo-se inferir que, ainda que em pequenas quantidades e bem próximo as raízes, houve nitrificação e, ou, houve formação de precipitados. Acredita-se, porém, que mesmo que houvesse pequena nitrificação, o nitrato gerado seria reduzido, pois como o sistema situava-se numa zona anóxica-anaeróbia, possivelmente bactérias heterótrofas utilizariam o nitrato como acceptor de elétrons no lugar do oxigênio, como citado por Pereira (2008).

### *Turbidez*

No SAC cultivado, observou-se a remoção máxima de 87,2% na turbidez da ARS, remoção média de 69,4%, não diferindo estatisticamente do SAC não cultivado, no qual foi obtida remoção máxima de 85,8% e média de 71,5%. Sklarz *et al.* (2009) verificaram remoções de 80,0~90,0% em SACs de escoamento vertical não cultivados, tratando esgoto doméstico, utilizando como meio suporte turfa, plástico de elevada área superficial e seixos de calcário, com taxas de recirculação de 4,5 a 2,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Valores semelhantes também foram observados por Brasil *et al.* (2005) tratando esgoto doméstico, em SACs de escoamento subsuperficial horizontal cultivados com *Typha* sp., com  $L_S$  orgânica variando entre 2,6 e 11,8 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DBO, utilizando como meio suporte brita "zero". Nos SACs com TRH de 1,9 dias foi observada remoção de 80% da turbidez e no SAC

com TRH de 3,8 dias, remoção de 86%. Freitas (2006) tratando ARS em SACs de escoamento horizontal, observou remoções de turbidez similares (60-66,6%) às encontradas no presente trabalho.

#### *Condutividade Elétrica*

Com remoções médias de 26,1% no SAC cultivado, a remoção de CE no efluente diferiu estatisticamente (teste Mann-Whitney,  $P = 0,031$ ) do SAC não cultivado, onde se observou remoção média de 22,9%.

Remoção média um pouco maior (33,8%) foi observada por Matos *et al.* (2009b). Entretanto, verifica-se, na literatura, que em SACs de escoamento vertical foram observadas, até mesmo, elevações na CE: Gross *et al.* (2007) pesquisando SACs sob  $L_S$  de  $77,4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO para o tratamento de águas cinzas verificaram aumento de 8% e Morari e Giardini (2009) tratando esgoto doméstico com  $L_S$  entre 0,9 a  $2,8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO, observaram aumento de 37% na CE do efluente dos SACs.

De certa forma, as remoções obtidas neste experimento podem ser consideradas razoáveis, visto que SACs em geral não são apresentadas eficientes na redução de CE e geralmente não são observadas reduções nestes sistemas (Gross *et al.*, 2007, Morari e Giardini, 2009).

#### *Potencial Hidrogeniônico*

O valor médio do pH observado na ARS afluente foi de 7,5 e, em ambos os tratamentos, o valor médio de pH efluente foi elevado a 8,0. Essa elevação pode ser devida à utilização do dióxido de carbono pelas plantas e algas, tal como cita Kadlec e Wallace (2009), bem como pelo processo de desnitrificação, que libera hidroxilas ao meio. Como verificado anteriormente, ocorreu remoção de nitrato do sistema, sendo que, possivelmente, uma parte tenha sido absorvida pela planta e outra parte sofrido desnitrificação, visto que a reação verificada em condições anaeróbias, com pH do meio superior a 7,0, é de modo simplificado dado pela seguinte reação:  $2 \text{ NO}_3^- + 6 \text{ H}_2\text{O} + 10 \text{ e}^- \rightarrow \text{N}_2 (\text{g}) + 12 \text{ OH}^-$ . Condições

propícias à desnitrificação foram observadas neste experimento (afluente com pH médio de 7,5 e potencial redox de -395,2 mV).

Zurita *et al.* (2009) estudando SACs verticais, tratando esgoto doméstico, observaram valores semelhantes aos obtidos neste experimento, pH de entrada do sistema de 7,4 e de saída de 8,0. Similarmente, Sun *et al.* (2005) tratando ARS em SACs verticais, observaram elevações do pH de 6,9 para 7,5, com mínima redução do pH apenas no caso de recirculação do efluente, variando de 6,9 para 6,8.

### 3.2. Temperatura, umidade e evapotranspiração na casa de vegetação

A temperatura média do ar observada dentro da casa de vegetação foi de 27,7 °C e a média das temperaturas máxima e mínima observadas foram respectivamente 34,2 °C e 18,4 °C. A umidade relativa do ar média durante o experimento foi de 63,3%, sendo a maior e a menor umidade média relativa do ar, 80,5 e 53,0%, respectivamente. A evapotranspiração no SAC cultivado (2,7 mm d<sup>-1</sup>) foi estatisticamente superior (teste Mann-Whitney, P < 0,001), 1,8 vez maior, do que no SAC não cultivado (1,5 mm d<sup>-1</sup>), produzindo assim, além de um efluente melhor tratado, menor volume efluente para despejo em solos ou corpos hídricos. Kantawanichkul *et al.* (2009) observaram evapotranspiração de 20,1 mm d<sup>-1</sup> em SAC cultivado com *Cyperus involucratus*, 2,5 vezes maior que no SAC não cultivado (7,9 mm d<sup>-1</sup>).

Os valores observados por Kantawanichkul *et al.* (2009) foram superiores aos encontrados no presente trabalho, possivelmente por trabalharem com maiores áreas, maior densidade de plantas e principalmente pelo clima tropical, característico da Tailândia, onde fora realizado o experimento.

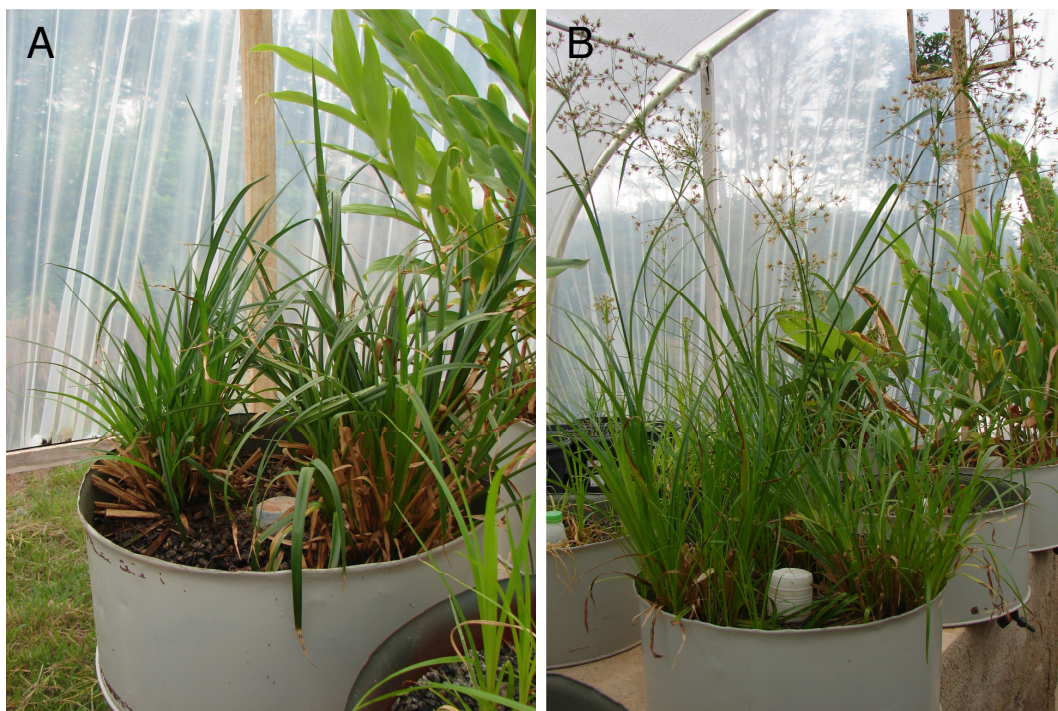
Maiores valores de evapotranspiração foram observados em SACs de escoamento horizontal, cultivados com *Typha* sp., estudados por Brasil e Matos (2008), que averiguaram uma evapotranspiração média de 9,3 mm d<sup>-1</sup>, na mesma região que fora realizado o presente experimento; esta evapotranspiração maior pode estar correlacionada com a maior demanda evapotranspirativa da *Typha* sp., pela maior área utilizada pelos SACs, por se situarem a céu aberto, sofrendo

maior influência dos ventos, bem como a menor umidade relativa que se encontra no lado externo da casa de vegetação.

### 3.3. A planta e os nutrientes

#### 3.3.1. Produção de massa

Na Figura 2.5.A está apresentado o SAC cultivado com *Cyperus* sp. aos 60 dias de aplicação de ARS e na Figura 2.5.B está apresentado o SAC cultivado com *Cyperus* sp. que recebeu somente água, para comparação do desenvolvimento das plantas. As plantas cultivadas nos SACs submetidos à aplicação de ARS apresentaram menor desenvolvimento, sendo que, aos 60 dias, ainda não havia apresentado produção de sementes. Apesar disso, notou-se uma coloração verde mais forte nas folhas, sinal de que houve maior absorção de nitrogênio pelas plantas. Infere-se que o menor desenvolvimento pode estar associado ao estresse devido à alta salinidade do meio, proporcionado pela ARS.



**Figura 2.5.** A – SAC sob aplicação de ARS, B - SAC sob aplicação de água.

Na Tabela 2.3 estão apresentados os dados referentes à produtividade de massa seca e verde, nas partes inferior, superior e total das plantas.

**Tabela 2.3.** Valores médios de produtividade, taxa de produtividade e produtividade unitária.

	Produtividade (kg m <sup>-2</sup> )		Taxa de Produtividade (g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	
	MS <sup>1</sup>	MV <sup>2</sup>	MS	MV
Superior	0,7	1,6	7,5	18,5
Inferior	1,4	4,9	-	-
Total	2,1	6,5	-	-

<sup>1</sup>MS – Massa Seca, <sup>2</sup>MV – Massa Verde

Com 3 plantas (densidade de 10,6 plantas m<sup>-2</sup>) no SAC sob aplicação de ARS, o *Cyperus* sp. produziu 1,7 kg m<sup>-2</sup> de massa verde aérea (parte superior), resultando em 0,7 kg m<sup>-2</sup> de massa seca. Comparando-se com o observado por Matos *et al.* (2009a), tratando ARS, em SACs horizontais sob a L<sub>S</sub> de 59,1 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO, verificou-se produtividades de matéria seca superiores às encontradas para o *Cyperus* sp. neste trabalho, sendo elas: 2,2; 2,6 e 2,8 kg m<sup>-2</sup> para *Typha latifolia*, *Alternanthera philoxeroides* e *Cynodon dactylon*, respectivamente. Estas produtividades são superiores às encontradas por Brasil *et al.* (2007) que trataram esgoto doméstico em SACs horizontais sob L<sub>S</sub> variando de 16,8 a 30,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO e observaram produtividade média para a *Typha* sp. de 0,7 kg m<sup>-2</sup>.

Verificou-se que a taxa de produtividade de massa seca superior do *Cyperus* sp. (7,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), esteve próxima à observada por Konnerup *et al.* (2009) para a *Canna* sp. (8,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e bem superior que a da *Heliconia* sp. (1,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), quando cultivadas em SACs de escoamento horizontal utilizados no tratamento de esgoto doméstico, aplicando uma L<sub>S</sub> de 22,6 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de DQO.

Comparando-se a produtividade unitária de biomassa verde do *Cyperus* sp. (1,7 g planta<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) na parte superior da planta, verificou-se valores superiores no experimento de Cheng *et al.* (2009) de 2,8 g planta<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para o *Cyperus flabelliformis* e valores inferiores, entre 0,4 e 0,5 g planta<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, para as espécies

*Acorus calamus*, *Phragmites australis* e *Vetiveria zizanioides*, cultivadas em SACs horizontais, tratando esgoto doméstico, sob uma  $L_S$  de  $2,6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO.

Trabalhando com *Cyperus involucratus* em SACs de escoamento vertical, tratando água residuária sintética ( $300 \text{ g m}^{-3}$  de DQO e  $300 \text{ g m}^{-3}$  de  $N_T$ ), sob  $L_S$  média de  $13,7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DQO, Kantawanichkul *et al.* (2009) observaram taxa de produtividade de matéria seca de  $28,7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , muito além do que se observou para o *Cyperus* sp. utilizado neste experimento.

Cheng *et al.* (2009), sob as condições anteriormente citadas, observaram que as maiores remoções de poluentes ocorreram no SAC cultivado com *Cyperus flabelliformis*, já que o mesmo apresentou a maior produção de biomassa e um crescimento mais rápido, corroborando, desta forma, que a vegetação tem influência significativa sobre a remoção dos poluentes.

### 3.3.2. Absorção de nutrientes e sódio pelas plantas

Verificou-se, na parte aérea do *Cyperus* sp., absorção de  $6,2 \text{ g}$  de nitrogênio,  $0,6 \text{ g}$  de fósforo,  $4,0 \text{ g}$  de potássio e  $0,3 \text{ g}$  de sódio, absorção essa, referente aos 90 dias de duração do experimento.

Comparando a taxa de absorção diária de nitrogênio do *Cyperus* sp. ( $0,24 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) com os encontrados na literatura observou-se que esta foi maior que a da *Canna* sp. ( $0,23 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e da *Heliconia* sp. ( $0,03 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) no experimento de Konnerup *et al.* (2009) tratando esgoto doméstico, sob a  $L_S$  de  $4,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de N. Li *et al.* (2008) observaram, em SACs cultivados com *Typha angustifolia*, tratando água eutrofizada do lago Taihu (China), sob a taxa de aplicação de  $3,1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de N, de escoamento vertical, horizontal e livre, taxas de absorção de nitrogênio de  $0,08$ ;  $0,11$  e  $0,12 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente, cujos valores foram inferiores aos encontrados para o *Cyperus* sp., neste trabalho.

A taxa de absorção diária do fósforo no *Cyperus* sp. observada foi de  $0,023 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , igual à encontrada por Li *et al.* (2008), em SACs cultivados com *Typha angustifolia* de escoamento livre, porém superior ao observado nos SACs de escoamento vertical ( $0,008 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e horizontal ( $0,011 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), cultivados

com a mesma espécie vegetal, tratando água eutrofizada do lago Taihu (China), com  $L_S$  de  $0,1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de P.

Na Tabela 2.4 pode-se observar a concentração das variáveis N, P, K e Na nas folhas do *Cyperus* sp.

**Tabela 2.4.** Valores de concentração de N, P, K e Na na parte aérea do *Cyperus* sp.

Parte Aérea	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Sódio
Concentração (dag $\text{kg}^{-1}$ )	3,2	0,3	2,1	0,1

Matos *et al.* (2008), ao trabalharem com *Cynodon* spp. em SACs de escoamento horizontal, tratando água residuária de laticínios, variando a taxa de aplicação orgânica entre 6,6 e 57,0  $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de DBO, observaram concentrações de 2,9~4,0 dag  $\text{kg}^{-1}$  de N, 0,3~0,4 dag  $\text{kg}^{-1}$  de P, 1,3~1,5 dag  $\text{kg}^{-1}$  de K e 0,04~0,07 dag  $\text{kg}^{-1}$  de Na. As concentrações de N e P foram semelhantes às encontradas neste trabalho, já as concentrações de sódio e potássio foram inferiores, porém com uma produtividade variando de 0,7 a 1,5  $\text{kg m}^{-2}$ . Estes valores foram superiores aos 0,7  $\text{kg m}^{-2}$  do *Cyperus* sp., fazendo com que a remoção, por área, de nutrientes fosse relativamente maior.

Com base no exposto verifica-se que a taxa de absorção dos nutrientes varia muito com a espécie vegetal, as condições climáticas, o tempo de retenção hidráulica e as características das águas residuárias aplicadas nos sistemas.

#### 4. CONCLUSÕES

- Ao término de 90 dias de experimentação, não se verificou diferença estatística entre SACs cultivados ou não em relação as variáveis analisadas, exceto para as variáveis NTK, AT, CE e P<sub>T</sub>.
- As remoções médias nos SACs cultivado e não cultivado foram de 37,5 e 28,5%, 30,2 e 25,6%, 26,1 e 22,9% e 55,9 e 44,4% para NTK, AT, CE e P<sub>T</sub>, respectivamente.
- O *Cyperus* sp produziu 674,5 g m<sup>-2</sup> de matéria seca, com uma taxa de produtividade de 7,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, com absorção de nutrientes equivalente a 21,8 g m<sup>-2</sup> de N; 2,1 g m<sup>-2</sup> de P; 14,0 g m<sup>-2</sup> de K e 0,9 g m<sup>-2</sup> de Na.
- A evapotranspiração, estatisticamente superior (teste Mann-Withney, P < 0,001) no SAC cultivado que a evaporação no SAC não cultivado, tem papel fundamental na contabilização da remoção mássica das variáveis analisadas.
- A elevação do potencial redox nos SACs cultivados não foi relevante a ponto de tornar expressiva a nitrificação no meio.
- O cultivo de plantas em SACs se faz importante para que se possa atingir maiores remoções de nutrientes e sódio da ARS.

## REFERÊNCIAS

- APHA [American Public Health Association]; AWWA [American Water Works Association]; WEF [Water Environment Federation]. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2005. 1268 p.
- ASLAM, M.M.; MALIK, M.; BAIG, M.A.; QAZI, I.A.; IQBAL, J. Treatment performances of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan. **Ecological Engineering**, v.30, n.1, p.34-42. 2007.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.13, n.3, p.323-328, 2008.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T. Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Typha* sp.) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12, n.3, p.266-272, 2007.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A. Qualidade de efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.133-137, 2005.
- BRIX, H.; ARIAS, C.A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. **Ecological Engineering**, v.25, n.5, p.491-500. 2005.
- CHENG, X.Y.; LIANG, M.Q.; CHEN, W.Y.; LIU, X.C.; CHEN, Z.H. Growth and contaminant removal effect of several plants in constructed wetlands. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.51, n.3, p.325-335. 2009.
- FAULWETTER, J.L.; GAGNON, V.; SUNDBERG, C.; CHAZARENC, F.; BURR, M.D.; BRISSON, J.; CAMPER, A.K.; STEIN, O.R. Microbial

- processes influencing performance of treatment wetlands: A review. **Ecological Engineering**, v.35, n.6, p.987-1004. 2009.
- FIA, R.; MATOS, A.T.; FERREIRA, P.A.; TEODORO, P.E.P.; SCHUERY, F.C.; LUIZ, F.A.R. Desempenho agrônômico da *Typha* sp. e *Aternanthera philoxeroides* Mart utilizadas no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro em sistemas alagados construídos. **Engenharia na Agricultura**, v.16, p.436-448, 2008.
- FREITAS, W.S. **Desempenho de sistemas alagados construídos, cultivados com diferentes espécies vegetais, no tratamento de águas residuárias da suinocultura**. 2006. 159f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- GROSS, A.; SHMUELI, O.; RONEN, Z.; RAVEH, E. Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) - a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households. **Chemosphere**, v.66, n.5, p.916-923. 2007.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. **Treatment Wetlands**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 1016 p.
- KANTAWANICHKUL, S.; KLADPRASERT, S.; BRIX, H. Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus involucratus*. **Ecological Engineering**, v.35, n.9, p.238-247. 2009.
- KANTAWANICHKUL, S.; NEAMKAM, P.; SHUTES, R.B.E. Nitrogen removal in a combined system: vertical vegetated bed over horizontal flow sand bed. **Water Science and Technology**, v.44, n.11-12, p.137-142. 2001.
- KLOMJEK, P.; NITISORAVUT, S. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. **Chemosphere**, v.58, n.5, p.585-593. 2005.
- 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, n.2, p.248-257. 2009.
- LANGERGRABER, G. Simulation of the treatment performance of outdoor subsurface flow constructed wetlands in temperate climates. **Science of the Total Environment**, v.380, n.1-3, p.210-219. 2007.
- LI, L.; LI, Y.; BISWAS, D.K.; NIAN, Y.; JIANG, G. Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China. **Bioresource Technology**, v.99, n.6, p.1656-1663. 2008.
- MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; PEREIRA, O.G. Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*Cynodon* spp.) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. **Ambiente & Água**, v.3, n.1, p.43-53, 2008.
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; LO MONACO, P.A.V. Capacidade extratora de diferentes espécies vegetais cultivadas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Ambiente & Água**, v.4, n.2, p.31-45, 2009a.
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; FIA, R.; MATOS, M.P. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura visando seu reuso. **Engenharia na Agricultura**, v.17, p.383-391, 2009b.
- MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; BRASIL, M.S.; BORGES, A.C. Influência da espécie vegetal cultivada nas condições redox de sistemas alagados construídos. **Engenharia Agrícola**, no prelo, 2010.
- MAZZOLA, M.; ROSTON, D.M.; VALENTIM, M.A.A. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.276-283. 2005.
- MORARI, F.; GIARDINI, L. Municipal wastewater treatment with vertical flow constructed wetlands for irrigation reuse. **Ecological Engineering**, v.35, n.5, p.643-653. 2009.

- NIVALA, J.; HOOS, M.B.; CROSS, C.; WALLACE, S.; PARKIN, G. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. **Science of the Total Environment**, v.380, n.1-3, p.19-27. 2007.
- OLIVEIRA, A.S.; SANTOS, L.S.; IDE, C.N. Remoção de poluentes de efluentes de reator anaeróbio utilizando banhados construídos vegetados com Tangola. In: V Seminário de Iniciação Científica, Universidade Estadual de Goiás, 2007, Anápolis. **Anais... V Seminário de Iniciação Científica**, Universidade Estadual de Goiás, 2007.
- PEREIRA, R.M. **Aplicação do método respirométrico em wetlands para a determinação de parâmetros cinéticos**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2008.
- PROCHASKA, C.A.; ZOUBOULIS, A.I.; ESKRIDGE, K.M. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage. **Ecological Engineering**, v.31, n.1, p.57-66. 2007.
- SEZERINO, P.H.; REGINATTO, V.; SANTOS, M.A.; KAYSER, K.; KUNST, S.; PHILIPPI, L.S.; SOARES, H.M. Nutrient removal from piggery effluent using vertical flow constructed wetlands in southern Brazil. **Water Science and Technology**, v.48, n.2, p.129-135. 2003.
- SILVA, F.C. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2009. 627 p.
- SKLARZ, M.Y.; GROSS, A.; YAKIREVICH, A.; SOARES, M.I.M. A recirculating vertical flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater. **Desalination**, v.246, n.1-3, p.617-624. 2009.
- SUN, G.; GRAY, K.R.; BIDDLESTONE, A.J.; ALLEN, S.J.; COOPER, D.J. Effect of effluent recirculation on the performance of a reed bed system treating agricultural wastewater. **Process Biochemistry**, v.39, n.3, p.351-357. 2003.

- SUN, G.; ZHAO, Y.; ALLEN, S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. **Journal of Biotechnology**, v.115, n.2, p.189-197. 2005.
- TORRENS, A.; MOLLE, P.; BOUTIN, C.; SALGOT, M. Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent. **Water Research**, v.43, p.1851-1858, 2009.
- VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L. Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. **Ecological Engineering**, v.25, n.5, p.606-621. 2005.
- WANG, R.Y.; KORBOULEWSKY, N.; PRUDENT, P.; BALDY, V.; BONIN, G. Can vertical-flow wetland systems treat high concentrated sludge from a food industry? A mesocosm experiment testing three plant species. **Ecological Engineering**, v.35, n.2, p.230-237. 2009.
- WINTER, K.J.; GOETZ, D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v.48, n.5, p.9-14. 2003.
- YE, F.; LI, Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. **Ecological Engineering**, v.35, n.7, p.1043-1050. 2009.
- YU, K.W.; BOHME, F.; RINKLEBE, J.; NEUE, H.U.; DELAUNE, R.D. Major biogeochemical processes in soils - A microcosm incubation from reducing to oxidizing conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v.71, n.4, p.1406-1417. 2007.
- ZHAO, Y.J.; LIU, B.; ZHANG, W.G.; OUYANG, Y.; AN, S.Q. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands in responding to variation in influent C/N ratios of simulated urban sewage. **Bioresource Technology**, v.101, n.6, p.1693-1700. 2009.
- ZURITA, F.; DE ANDA, J.; BELMONT, M.A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and

horizontal subsurface-flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**,  
v.35, n.5, p.861-869. 2009.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### CONCLUSÕES GERAIS

Na primeira etapa deste trabalho, concluiu-se que:

- A influência das plantas no desempenho dos SACs foi positiva, aumentando a eficiência na remoção de poluentes, principalmente nutrientes.
- Em geral, sob maiores tempos de retenção hidráulica, os SACs apresentaram maiores eficiências na remoção de poluentes.
- A remoção mássica média de NTK nos SACs cultivados foi 1,3 vez superior às obtidas nos SACs não cultivados;
- A melhor combinação observada foi a dos SACs cultivados com *Cyperus* sp., operando sob TRH de 72 h, que apresentaram as maiores remoções mássicas médias, com valores de 69,1% da DQO, 56,5% do NTK, 64,3% do P<sub>T</sub> e 55,0% do K.

Em uma segunda etapa, após a observação de que a melhor combinação planta e tempo de retenção hidráulica foi o *Cyperus* sp. sob o TRH de 72 h, analisou-se o desempenho do SAC cultivado com a mesma espécie vegetal e operado, continuamente, por 90 dias, podendo-se concluir que:

- Ao término de 90 dias de experimentação, observaram-se diferenças significativas ( $P < 0,05$ ), para as variáveis NTK, AT e CE, com os respectivos testes e níveis de significância, teste t ( $P < 0,001$ ), teste t ( $P = 0,002$ ) e teste Mann-Whitney ( $P = 0,031$ ). As, remoções médias nos SACs cultivado e não cultivado foram de 37,5 e 28,5%, 30,2 e 25,6% e 26,1 e 22,9%, respectivamente para NTK, AT e CE. Para as demais variáveis analisadas, não foram observadas diferenças entre os sistemas alagados construídos avaliados.

- A remoção média de fósforo no SAC cultivado foi 11,5% maior que a obtida no SAC não cultivado (teste t,  $P = 0,056$ ).
- A produtividade média do *Cyperus* sp. foi de  $674,5 \text{ g m}^{-2}$ , com uma taxa de produtividade de matéria seca de  $7,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , com absorção de nutrientes equivalente a  $21,8 \text{ g m}^{-2}$  de N;  $2,1 \text{ g m}^{-2}$  de P;  $14,0 \text{ g m}^{-2}$  de K e  $0,9 \text{ g m}^{-2}$  de Na.
- A evapotranspiração, estatisticamente superior (teste Mann-Whitney,  $P < 0,001$ ) no SAC cultivado que a evaporação no SAC não cultivado, tem papel fundamental na contabilização da remoção mássica das variáveis analisadas.
- A elevação do potencial redox, proporcionada pela planta, não foi relevante para que houvesse nitrificação no meio.
- O cultivo de plantas em SACs se faz importante para que se possa atingir maiores remoções de nutrientes e sódio da ARS.

Sistema alagados construídos podem vir a ser uma solução plausível para complementar o tratamento de águas residuárias de suinocultura, promovendo remoção de poluentes, em geral, com ênfase nos nutrientes e sódio. De modo geral, os SACs de escoamento vertical podem ser considerados como parte das boas práticas agrícolas, conjugando uma técnica de baixo custo de instalação e operacional.

## SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

No presente estudo foi possível verificar que sistemas alagados construídos de escoamento vertical podem reduzir a carga orgânica, bem como a concentração de nutrientes da ARS. Entretanto, observou-se particularidades que devem ser estudadas melhor e pesquisas sobre o tema certamente contribuirão para um maior entendimento dos processos. Alguns tópicos que podem ser objetos de estudos futuros são listados a seguir:

- Estudos ao longo do tempo com diversos TRHs para uma melhor avaliação da influência do TRH sobre a remoção dos poluentes, bem como seus limites;
- Possível uso de outras espécies nesses sistemas. No caso de alagados construídos, o destino da massa vegetal é questão importante, podendo-se utilizar espécies que apresentem direta e, ou, indiretamente, retorno econômico;
- Verificação da potencialidade da aplicação para mitigação de outras águas residuárias;
- Para uma melhor avaliação da dinâmica dos nutrientes, principalmente do nitrogênio, quantificar todas as variações das formas do nitrogênio ( $\text{NH}_x$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{NO}_x$  etc.);
- Estudar as demais configurações dos sistemas alagados, tais como sistemas de escoamento vertical (ascendente ou descendente), sistemas híbridos ou conjugados;
- Estudar outros meios suportes: britas, areia, solo, camadas estratificadas, resíduos de materiais sintéticos etc.;
- Identificação dos micro-organismos presentes no processo, por meio de técnicas avançadas de microbiologia (Bactérias nitrificantes, desnitrificantes, ANAMMOX etc.);
- Mais estudos para verificação da aplicabilidade técnica e econômica, buscando a sustentabilidade do sistema.

- Participação de profissionais de diversas áreas (engenharia, biologia vegetal, microbiologia, química) visando a interdisciplinaridade na busca de uma melhor compreensão dos fenômenos.

## APÊNDICE

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância composta pelas variáveis NTK,  $N_{amon}$ ,  $P_T$ , K e AT (Graus de liberdade e respectivos Quadrados Médios)

F.V.	G.L.	DQO	NTK	$N_{amon}$	$P_T$	K	AT
<b>BLOCO</b>	2	10,7	5,6	13,0	20,3	6,9	4,1
<b>ESP</b>	3	12,4*	494,6*	531,4*	603,6*	216,5*	39,8 <sup>n.s.</sup>
<b>TRH</b>	3	1152,8*	202,6*	317,7*	138,5*	691,8*	401,0*
<b>ESP.TRH</b>	9	7,5 <sup>n.s.</sup>	1,8 <sup>n.s.</sup>	8,5 <sup>n.s.</sup>	23,1 <sup>n.s.</sup>	22,4*	20,4 <sup>n.s.</sup>
<b>RESIDUO</b>	24	17,9	5,7	18,7	21,6	5,5	7,0
<b>C.V. (%)</b>		7,2	6,8	12,0	10,0	7,8	10,3

\* F significativo a 1% de probabilidade; <sup>n.s.</sup> F não significativo.

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância composta pelas variáveis  $N-NO_3^-$ , CE, Turbidez e ORP (Graus de liberdade e respectivos Quadrados Médios)

F.V.	G.L.	$N-NO_3^-$	CE	Turbidez	ORP
<b>BLOCO</b>	2	75327,4	0,5	173,4	15,5
<b>ESP</b>	3	41168,4 <sup>n.s.</sup>	43,1 <sup>n.s.</sup>	2797,8*	627,4*
<b>TRH</b>	3	1248062,0*	186,1*	2852,9*	529,2*
<b>ESP.TRH</b>	9	15510,5 <sup>n.s.</sup>	9,6 <sup>n.s.</sup>	615,1*	30,5*
<b>RESIDUO</b>	24	19635,4	3,6	60,3	5,6
<b>C.V. (%)</b>		60,4	11,0	40,6	1096,2

\* F significativo a 1% de probabilidade; <sup>n.s.</sup> F não significativo

**Tabela 3.** Análise da interação entre as espécies e os TRHs para a variável K

Espécies X TRHs	Médias de Remoção (%)			
	24	48	72	96
<i>Cyperus</i> sp.	27,9 aC	37,2 abAB	41,9 aA	33,9 aBC
<i>Hedychium</i>	14,7 bC	35,1 abA	34,2 bA	25,4 bB
<i>Heliconia</i>	14,0 bC	32,2 bA	33,0 bA	25,3 cB
Controle	25,7 aB	39,0 aA	37,8 abA	26,2 bB

Pelo teste Tukey, a 1% de probabilidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem entre si e médias seguidas da mesma letra maiúscula, nas linhas, não diferem entre si.

**Tabela 4.** Análise da interação entre as espécies e os TRHs para a variável Turbidez

Espécies X TRHs	Médias de Remoção (%)			
	24	48	72	96
<i>Cyperus</i> sp.	24,4 aA	-38,7 cB	-20,4 bB	29,3 abA
<i>Hedychium</i>	43,2 aA	17,9 abB	13,3 aB	14,4 bB
<i>Heliconia</i>	30,3 aA	1,1 bB	20,1 aAB	28,5 abA
Controle	44,4 aA	29,2 aA	28,0 aA	40,7 aA

Pelo teste Tukey, a 1% de probabilidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem entre si e médias seguidas da mesma letra maiúscula, nas linhas, não diferem entre si.

**Tabela 5.** Análise da interação entre as espécies e os TRHs para a variável ORP

Espécies X TRHs	Médias de Elevação (%)			
	24	48	72	96
<i>Cyperus</i> sp.	19,5 aA	16,4 aA	6,4 aB	-4,35 aC
<i>Hedychium</i>	7,6 bA	0,9 bAB	-3,6 bBC	-7,5 abC
<i>Heliconia</i>	3,8 bcA	1,0 bAB	-3,5 bBC	-8,1 abC
Controle	-1,9 cA	-8,4 cAB	-8,7 bB	-13,0 bB

Pelo teste Tukey, a 1% de probabilidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem entre si e médias seguidas da mesma letra maiúscula, nas linhas, não diferem entre si.