

EFICIÊNCIA DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS NA REMOÇÃO DE POLUENTES DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

ANTONIO T. MATOS¹, SÉRGIO S. ABRAHÃO², PAOLA A. V. LO MONACO³

RESUMO: Objetivou-se avaliar a eficiência de sistemas alagados construídos (SACs), cultivados com dois diferentes capins e cinco taxas de carregamento orgânico (TCOs) na remoção de poluentes de águas residuárias de indústria de laticínios (ARL). Para isso, unidades experimentais foram constituídas por um SAC sem vegetação (SV), cinco SACs cultivados com capim-elefante (SACs-CF) e cinco SACs cultivados com capim-tifton 85 (SACs-CT), com escoamento subsuperficial horizontal. A ARL foi aplicada numa vazão média de 60 L d⁻¹ e tempo de residência hidráulica de 4,8 dias e TCOs de 66; 130; 190; 320 e 570 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅. Os SACs mostraram-se eficientes na remoção da DBO, DQO e dos SSTs, STs e NTKs, porém foram pouco eficientes na remoção de P-total, K e Na da ARL. As duas forrageiras avaliadas apresentaram semelhante influência no processo de remoção de DBO₅, DQO, ST, SST, P-total, K e Na, quando comparadas com sistemas que operaram com mesma taxa de carregamento orgânico, tendo as remoções de DBO e DQO ficado na faixa de 79 a 96 % e 85 a 97 %, respectivamente. O SAC sem vegetação (SV) apresentou desempenho semelhante ao dos SACs vegetados na remoção de DBO₅, DQO, ST, SST e Na, enquanto o cultivado com capim-tifton foi mais eficiente na remoção de NTK.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de resíduos, leitões cultivados, sistemas wetlands.

PERFORMANCE OF CONSTRUCTED WETLANDS SYSTEMS IN POLLUTANTS REMOVAL OF DAIRY INDUSTRY WASTEWATER

ABSTRACT: The objective for this research was evaluate the efficiency of constructed wetlands systems (CWS), cultivated with two different grasses and five organic loading rates (OLRs), in the removal of pollutants from dairy industry wastewater (DIW). For this, experimental units were formed by a CWS without vegetation (CWS-SV), with five CWS cultivated elephant grass (CWS-EG) and five cultivated with Tifton 85 grass (CWS-TG), with horizontal subsurface flow. The DW has been applied in average flow of 60 L day⁻¹ and hydraulic residence time of 4.8 days and average surface organic loading rates (OLR) of 66, 130, 190, 320 and 570 kg ha⁻¹ day⁻¹ of BOD. The CWS were efficient in removal BOD₅, COD, TSS, TS and TKN, but were inefficient in P-total, K and Na removal of the DIW. The two evaluated grass had similar influence in the BOD₅, COD, TS, TSS, total-P, K and Na removal, when compared with systems that operated with the same OLR and the removal of BOD₅ and COD were in range 79-96 % and 85-97 %. The CWS-SV performance was similar to the cultivated CWS in the removal of BOD₅, COD, TS, TSS and Na, but while the cultivated with tifton was more efficient in removing TKN.

KEYWORDS: waste treatment, cultivated beds, wetlands systems.

INTRODUÇÃO

O uso da água no processamento de alimentos gera grandes quantidades de efluentes líquidos que necessitam ser tratados antes do seu lançamento em corpos hídricos receptores. Dentre as indústrias alimentícias, a contribuição dos laticínios na poluição dos corpos hídricos é muito expressiva, visto que o beneficiamento do leite gera considerável carga poluidora, decorrente da

¹ Eng. Agrícola, Professor, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, atmatos@ufv.br.

² Eng. Agrícola, Mestre em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, sergio@ctazm.com.br.

³ Eng^a Agrícola, Professora, Doutora em Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, *campus* Centro Serrano, paolalomonaco2004@yahoo.com.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 16-6-2011

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 1-7-2012

presença de grande quantidade de compostos orgânicos em suspensão nas águas residuárias do processo.

O volume de água residuária gerado na atividade pode variar de 1 a 5 vezes o volume de leite processado, dependendo do produto final produzido e do nível tecnológico da indústria de laticínios (MATOS et al., 2011) e, com base na carga poluente que essas águas possuem, pode-se inferir que grandes impactos ambientais podem ser proporcionados se elas não forem dispostas ou tratadas e lançadas de forma inadequada no ambiente.

No que refere ao aspecto qualitativo, as opções para tratamento ou recuperação de águas servidas envolvem inúmeras e diferentes alternativas (sistemas anaeróbios, sistemas aeróbios e sistemas conjugados), muitas delas onerosas e complexas, e outras de baixo custo e simples. Dentre essas alternativas, deve-se destacar o uso de Sistemas Alagados Construídos (SACs) ou sistemas *Wetlands construídos* (MATOS et al., 2008).

Os SACs são reservatórios preenchidos com materiais porosos, de alta condutividade hidráulica, geralmente constituídos por brita, que servem de suporte para o cultivo de macrófitas. No meio suporte, desenvolve-se um biofilme entremeado pelas raízes das plantas que proporciona a degradação de parte da matéria orgânica em solução, além da remoção, por meio de processos físicos, de sólidos sedimentáveis e sólidos suspensos. Assim, no sistema meio poroso-planta—microrganismos, ocorre a depuração dos resíduos (CHAGAS et al., 2012).

As espécies vegetais a serem selecionadas para cultivos em SACs devem ser perenes, ter alta tolerância ao excesso de água e a ambientes eutrofizados, ser de fácil propagação e crescimento rápido, ser de fácil colheita e manejo e possuir alta capacidade de remoção de nutrientes e poluentes (MATOS et al., 2008). Diversos trabalhos utilizando forrageiras, como o azevém e a aveia-preta (FIA et al., 2010), e os capins tifton 85 (FIA et al., 2011; MATOS et al., 2010a; 2010b e 2010c) e elefante (MATOS, et al. 2008 e 2010a), têm demonstrado elevada eficiência como extratores de nutrientes e poluentes de diversos tipos de águas residuárias tratadas em SACs.

Em razão da pouca disponibilidade de informações acerca da eficiência de remoção de poluentes em SACs, quando utilizados no tratamento de águas residuárias da indústria de laticínios, no presente trabalho, teve-se como objetivo avaliar a eficiência de sistemas alagados construídos (SACs), cultivados com capim-elefante cv. Napier (*Pennisetum purpureum schum*) e capim-tifton 85 (*Cynodon* spp), quando submetidos a diferentes taxas de carregamento orgânico, na remoção de poluentes de águas residuárias de laticínios.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa - DEA/UFV, em Viçosa, Minas Gerais.

Para a realização dos estudos, foram utilizadas águas residuárias brutas provenientes da Usina de Beneficiamento de Leite, da Fundação Arthur Bernardes (Laticínios da FUNARBE), localizada no Câmpus da UFV, coletadas numa caixa de passagem, onde se concentra todo o efluente originado dos diversos setores de produção da indústria de laticínios.

O experimento foi conduzido em onze leitos de sistemas alagados, construídos (SACs) com escoamento subsuperficial horizontal para tratamento secundário/terciário de água residuária da indústria de laticínios (ARL). Cada SAC foi constituído por um tanque de 0,40 x 0,75 x 3,00 m, impermeabilizado, preenchido com substrato de brita zero (volume de vazios de 0,44 m³ m⁻³), declividade de base de 0,5 % no sentido longitudinal do tanque e profundidade do leito filtrante de 0,33 m. As unidades experimentais foram constituídas por um SAC sem vegetação (SV), cinco SACs cultivados com capim-elefante (CF) e cinco SACs cultivados com capim-tifton 85 (CT).

A água residuária afluenta aos SACs foi aplicada nos tanques, numa vazão média de 60 L dia⁻¹, e tempo de residência hidráulica igual a 4,8 dias, proporcionando profundidade molhada de 0,3 m em todos os SACS. As taxas de carregamento orgânico superficial aplicadas (TCOs) nos SACs foram de 66; 130; 190; 320 e 570 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅, embora pequenos desvios tenham ocorrido nos valores médios aplicados, sendo os tratamentos denominados de CT e CF-66; CT e CF-130; CT e CF-190; CT e CF-320, e CT e CF-570, respectivamente. As diferentes TCOs afluentes foram obtidas por meio de misturas da água residuária da indústria de laticínios (ARL) bruta, que tinha DBO₅ de aproximadamente 2.500 mg L⁻¹, com água “limpa”, captada em manancial de água superficial (AM), conforme apresentado na Tabela 1. No SAC sem vegetação (SV), foi aplicada, diariamente, uma TCO superficial média de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅.

TABELA 1. Taxas de carregamento orgânico média superficial (TCOs) e média volumétrica (TCOv), expressas em termos de DBO₅ e DQO (entre parêntesis) e volumes aplicados diariamente de água residuária da indústria de laticínios (ARL) e água do manancial (AM). **Average surface organic loading rates (OLR) and average volumetric (OLRv), in terms of BOD₅ and COD (in brackets), and volume daily applied of dairy industry wastewater (DW) and the water source (WS).**

SAC	TCOs	TCOv	ARL	AM
	média e dv-padrão	média e dv-padrão		
	(kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	(g m ⁻³ d ⁻¹)	(L d ⁻¹)	(L d ⁻¹)
CT-570	571 ± 129 (1.053 ± 67)	433 ± 98 (798 ± 51)	45	15
CF-570	571 ± 129 (1.053 ± 67)	433 ± 98 (798 ± 51)	45	15
CT-320	319 ± 72 (588 ± 38)	242 ± 54 (445 ± 29)	25	35
CF-320	319 ± 72 (588 ± 38)	242 ± 54 (445 ± 29)	25	35
CT-190	193 ± 43 (355 ± 23)	146 ± 32 (269 ± 18)	15	45
CF-190	193 ± 43 (355 ± 23)	146 ± 32 (269 ± 18)	15	45
CT-130	130 ± 28 (236 ± 16)	98 ± 21 (179 ± 12)	10	50
CF-130	130 ± 28 (236 ± 16)	98 ± 21 (179 ± 12)	10	50
CT-66	66 ± 14 (122 ± 9)	50 ± 10 (99 ± 6)	5	55
CF-66	66 ± 14 (122 ± 9)	50 ± 10 (99 ± 6)	5	55
SV-130	130 ± 28 (236 ± 16)	98 ± 21 (179 ± 12)	10	50
Consumo diário total de ARL e AM			210	450

Sendo: CT – leito cultivado com capim-tifton 85; CF – leito cultivado com capim-elefante e SV – leito sem vegetação. Os números complementares às siglas representam a taxa de carregamento orgânico superficial estabelecida para aplicação nos SACs.

Nas coletas em que a água residuária bruta da indústria de laticínios apresentou valor de DBO_5 inferior a 2.500 mg L^{-1} , foi necessária a adição de soro de leite para a equalização da ARL a ser aplicada nos SACs. Do tanque de equalização, a ARL foi conduzida diariamente, utilizando-se de uma mangueira e de uma válvula de 1", até o reservatório de dosagem de cada SAC. Cada reservatório recebia o volume de ARL correspondente à TCO a ser aplicada e o complemento de água do manancial (AM), até ser atingido o volume de 60 L (Tabela 1). Com base nesse volume, o tempo de residência hidráulica foi estimado em 4,8 dias, o que foi mantido constante em todos os SACs.

As variáveis demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo total (P-total), potássio (K) e sódio (Na) foram determinadas na ARL contida no tanque de equalização, na AM e no afluente e efluente dos SACs, excetuando-se o potencial hidrogeniônico (pH) e a condutividade elétrica (CE), os quais foram medidos apenas na ARL e na AM. As amostras foram coletadas a cada 14 dias, no período de 84 dias. As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Água, do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em conformidade com recomendações do *Standard Methods...* (APHA et al., 2005), para as análises da água de manancial, água residuária bruta e afluente e efluente dos SACs. As variáveis avaliadas e os respectivos métodos estão descritos a seguir: pH e CE – métodos potenciométricos; DBO_5 - quantificação do oxigênio dissolvido pelo método iodométrico (Processo Winkler); DQO – método de oxidação química em refluxo aberto; ST e SST - método gravimétrico; SDT - diferença entre os STs e os SSTs; NTK - processo semimicro Kjeldahl. Após digestão nítrico-perclórico da amostra, foram quantificadas as concentrações de P_{Total} – espectrofotometria e Na e K - fotometria de chama.

As principais características físicas, químicas e bioquímicas da água residuária da indústria de laticínios (ARL), coletadas por ocasião das descargas de efluentes com maior concentração de poluentes, e da água de manancial (AM), utilizadas para a dosagem das TCOs, estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Características físicas, químicas e bioquímicas da água residuária da indústria de laticínios (ARL) e da água de manancial (AM), utilizadas no preparo das águas residuárias aplicadas nos SACs. **Physical, chemical and biochemical characteristics of the dairy industry wastewater (DW) and the water source (WS) used in the preparation of the applied wastewater in the CWS.**

Variáveis	Unidade	Média e Desvio-Padrão	
		ARL	AM
pH	---	$3,78 \pm 0,47$	$6,94 \pm 0,17$
CE	$\mu\text{S cm}^{-1}$	994 ± 110	89 ± 14
DBO_5	mg L^{-1}	2.790 ± 633	12 ± 4
DQO	mg L^{-1}	5.143 ± 328	20 ± 6
SS	mg L^{-1}	702 ± 100	3 ± 3
ST	mg L^{-1}	2.407 ± 442	104 ± 41
SDT	mg L^{-1}	1.705 ± 479	101 ± 43
NTK	mg L^{-1}	$89,54 \pm 17,3$	$3,33 \pm 5,7$
P-total	mg L^{-1}	$22,51 \pm 5,1$	$0,12 \pm 0,17$
Potássio	mg L^{-1}	$66,36 \pm 23,9$	$3,77 \pm 1,5$
Sódio	mg L^{-1}	$107,72 \pm 98,4$	$8,43 \pm 4,2$

Para a avaliação dos resultados relacionados à qualidade do afluente e do efluente dos SACs, utilizou-se a metodologia estatística paramétrica, sendo adotado o método do Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Cada DIC teve como fator uma das cinco TCOs aplicadas. No caso das TCOs equivalentes a 66; 190; 320 e 570 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅, cada DIC foi constituído por dois tratamentos relacionados a uma mesma variável, sendo um tratamento associado a um SAC cultivado com capim-tifton 85 e o outro a um SAC cultivado com capim-elefante. No caso da TCO de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅, cada DIC foi constituído por três tratamentos representados pelos três SACs (cultivado com capim-elefante, capim-tifton 85 e não cultivado). Para a análise estatística das variáveis DBO, DQO, SST, ST, NTK, P_{Total}, potássio e sódio, utilizou-se, como repetição, de valores equivalentes à relação entre a concentração efluente e a concentração afluente (C/C₀), obtidos nas seis amostragens analisadas durante o período de operação dos sistemas. Por meio dos resultados obtidos a partir de cada DIC, foi possível comparar o desempenho dos SACs, submetidos às mesmas TCOs, na remoção de DBO₅, DQO, SST, ST, NTK, P_{Total}, potássio e sódio da água residuária. Para a verificação das pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias dos efeitos do erro experimental, foram aplicados o teste de Lilliefors e os testes de Cochran Bartlett, respectivamente, e para a comparação do desempenho entre SACs que operaram com mesma TCO, utilizou-se da Análise de Variância (ANOVA, P = 0,05) e do teste de Tukey (P = 0,05).

A título de avaliação do desenvolvimento do sistema radicular das plantas nos SACs, ao final do experimento, plantas foram retiradas do sistema para análise visual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 3 e 4, estão apresentados os valores médios e o desvio-padrão da concentração das diversas variáveis monitoradas (DBO₅, DQO, ST, SST e NTK) do afluente e efluente, e a eficiência na sua remoção, em função das taxas de carregamento orgânico superficiais (TCOs) aplicadas aos SACs cultivados com capins-tifton 85 e elefante. Na Tabela 5, estão apresentadas as eficiências obtidas na remoção dessas variáveis nos SACs submetidos às TCOs médias de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹. Como não houve remoção de P-total, K e Na, pelo menos quando não se considera as perdas de água por evapotranspiração nos SACs, apenas os valores médios e o desvio-padrão de concentração no afluente e efluente estão apresentados na Tabela 6, referente à TCO de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹. Na Figura 1, estão apresentadas as médias das relações de efluente e afluente (C/C₀) da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Suspensos (SS), Nitrogênio Total Kjeldal (NTK), Fósforo total (P-total), Potássio e Sódio nos SACs, em função das TCOs aplicadas.

TABELA 3. Valores médios e desvio-padrão das variáveis DBO₅, DQO, ST, SST, NTK, P_{total}, K e Na do afluente e efluente dos SACs cultivados com capins-tifton 85 e elefante. **Average values and standard deviation of the variables BOD₅, COD, TS, TSS, TKN, total P, K and Na of the affluent and effluent of the CWS cultivated with tifton 85 and elephant grasses.**

Variável		Taxas de Carregamento Orgânico Superficial (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)									
		66		130		190		320		570	
		c. tifton	c. elefante	c. tifton	c. elefante	c. tifton	c. elefante	c. tifton	c. elefante	c. tifton	c. elefante
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	Afluente	244±50		475±103		707±156		1170±262		2095±474	
	Efluente	50±32	34±24	36±13	32±14	40±13	32±14	41±28	54±36	94±128	107±98
DQO (mg L ⁻¹)	Afluente	447±31		865±57		1301±85		2154±139		3862±247	
	Efluente	69±59	58±53	42±28	39±35	54±53	50±47	88±86	71±65	114±133	241±300
ST (mg L ⁻¹)	Afluente	296±65		488±96		680±130		1064±198		1831±337	
	Efluente	263±64	319±36	337±77	300±66	398±113	401±106	455±167	461±121	698±297	743±294
SST (mg L ⁻¹)	Afluente	61±8		119±16		178±25		294±42		527±75	
	Efluente	29±22	15±11	42±14	41±9	45±9	41±20	57±16	51±24	63±27	59±21
NTK (mg L ⁻¹)	Afluente	11±6		18±7		25±8		39±10		68±14	
	Efluente	5±3	9±7	5±3	10±4	13±12	17±10	17±9	27±18	30±12	34±13
P _{Total} (mg L ⁻¹)	Afluente	1,99±0,43		3,85±0,84		5,72±1,26		9,45±2,10		16,91±3,80	
	Efluente	3,88±1,42	3,74±1,77	5,14±1,06	6,66±2,62	4,99±1,16	5,44±1,80	9,99±1,64	7,55±1,79	14,28±3,53	16,07±3,52
K (mg L ⁻¹)	Afluente	9,0±2,3		14,2±4,1		19,4±6,0		29,9±9,9		50,7±17,9	
	Efluente	8,9±2,4	9,5±2,2	11,3±2,5	15,0±5,5	16,4±5,7	20,0±8,7	27,0±10,3	27,5±9,9	47,5±23,2	46,6±17,7
Na (mg L ⁻¹)	Afluente	17±12		25±19		33±27		50±43		83±75	
	Efluente	22±19	20±14	27±20	25±18	37±33	37±34	51±44	50±44	79±61	76±59

TABELA 4. Eficiência na remoção das variáveis DBO₅, DQO, SST e NTK em função das Taxas de Carregamento Orgânico Superficial (TCOs) aplicadas aos SACs cultivados com capins tifton 85 e elefante. **Removal efficiency of the variables BOD₅, COD, TSS and TNK according to the surface Organic Loading Rate (OLR) applied on the CWS cultivated with tifton 85 and elephant grasses.**

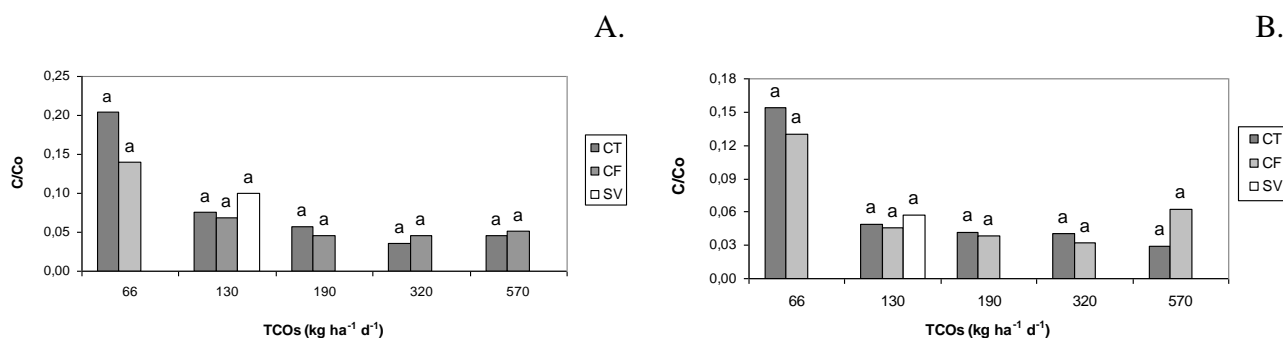
Variável	Eficiência de Remoção (%)					
	Taxa de Carregamento Orgânico Superficial (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)					
	Forrageira	66	130	190	320	570
DBO ₅	c. tifton-85	78,5 ± 15,1	91,6 ± 4,5	93,8 ± 2,7	96,3 ± 2,9	94,9 ± 7,1
	c. elefante	85,3 ± 11,9	93,2 ± 3,2	95,3 ± 2,5	95,0 ± 3,8	94,4 ± 5,1
DQO	c. tifton-85	84,7 ± 13,0	95,2 ± 3,1	95,9 ± 3,9	95,9 ± 3,6	97,1 ± 3,4
	c. elefante	87,2 ± 11,5	95,5 ± 3,9	96,2 ± 3,5	96,7 ± 2,9	93,8 ± 7,6
SST	c. tifton-85	50 ± 42	65 ± 14	74 ± 7	81 ± 6	88 ± 6
	c. elefante	75 ± 20	64 ± 12	76 ± 14	82 ± 10	89 ± 5
NTK	c. tifton-85	51 ± 29	70 ± 19	53 ± 27	58 ± 12	56 ± 12
	c. elefante	14 ± 20	43 ± 20	34 ± 25	34 ± 30	50 ± 11

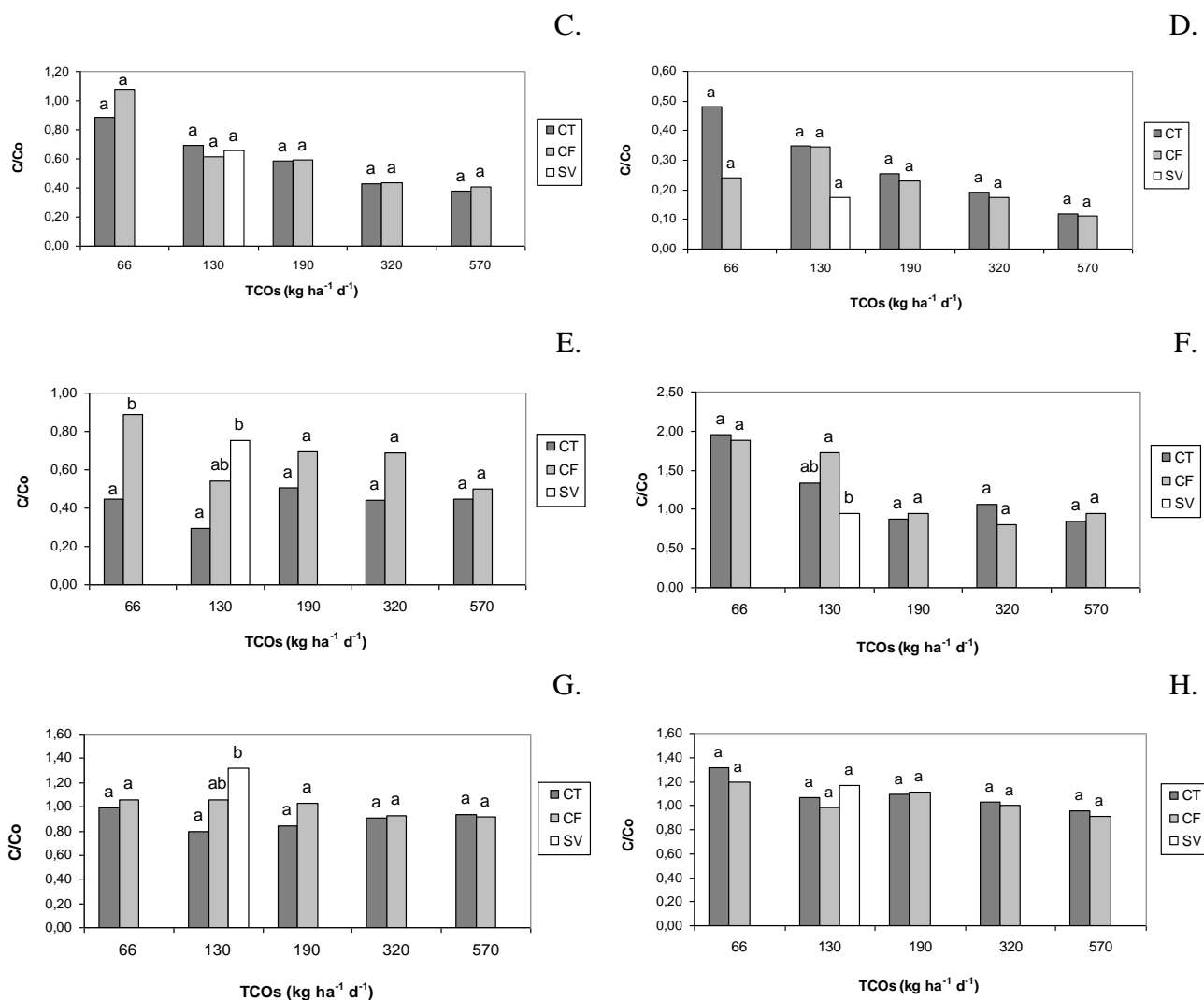
TABELA 5. Eficiência na remoção das variáveis DBO₅, DQO, ST, SST e NTK em função dos tratamentos que receberam TCOs de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹. **Removal efficiency of the variables BOD₅, COD, TS, TSS and TNK, according the treatments that receive surface OLR of 130 kg ha⁻¹ day⁻¹.**

Variável	Eficiência na remoção (%)		
	Tratamentos		
	CT – 130	CF – 130	SV - 130
DBO ₅	91,6 ± 4,5	93,2 ± 3,2	89,3 ± 5,6
DQO	95,2 ± 3,1	95,5 ± 3,9	94,4 ± 5,1
ST	30,9 ± 6,3	37,4 ± 13,9	32,2 ± 21,4
SST	64,56 ± 13,60	64,27 ± 11,84	81,81 ± 14,34
NTK	70,4 ± 19,1	43,3 ± 19,9	29,3 ± 23,1

TABELA 6. Valores médios e desvio-padrão da concentração das variáveis DBO₅, DQO, P_{Total}, K e Na, em afluentes e efluentes, em função dos tratamentos que receberam TCOs média de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹. **Average values and standard deviation in concentration of influent and effluent variables BOD₅, COD, Total P, K and Na, according the treatments that receive surface OLR of 130 kg ha⁻¹ day⁻¹.**

Variável	Tratamentos					
	CT – 130		CF – 130		SV - 130	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
P _{Total}	3,85 ± 0,84	5,14 ± 1,06	3,85 ± 0,84	6,66 ± 2,62	3,85 ± 0,84	3,68 ± 1,42
K	14,2 ± 4,1	11,3 ± 2,5	14,2 ± 4,1	15,0 ± 5,5	14,2 ± 4,1	18,8 ± 3,4
Na	25 ± 19	27 ± 20	25 ± 19	25 ± 18	25 ± 19	29 ± 22





Sendo: CT – SACs cultivados com capim-titon 85; CF – SACs cultivados com capim-elefante; e SV – SACs não cultivados. As médias seguidas por mesma letra e correspondentes à mesma TCO não diferem entre si, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

FIGURA 1. Média das relações C/C₀ de DBO₅ (A), DQO (B), ST (C), SS (D), NTK (E), P-total (F), K-total (G) e Na (H) nos SACs, em função das TCOs aplicadas. **Average of the C/C₀ ratio of BOD₅ (A), COD (B), TS (C), SS (D), TKN (E), total-P (F), total-K (G) and Na (H) in CWS, according applied OLR.**

Todos os SACs, inclusive aqueles em que foram aplicadas as maiores TCOs, foram eficientes na remoção de DBO₅, tendo sido obtido o menor valor médio, que foi de 78,5 %, no SAC CT-66, e máximo de 96,3 %, no SAC CT-320 (Tabela 4), enquanto no SAC não cultivado (SV-130) foi obtida remoção de 89,3 %. Dentre os vários fatores que contribuíram para que se obtivesse esse elevado desempenho nos SACs, deve-se destacar o efeito do tempo de detenção hidráulica (TDH = 4,8 dias) a que ficou submetida a ARL, suficiente para que se obtivesse eficiência no processo de remoção. Tal fato também pôde ser constatado por FIA et al. (2010), os quais concluíram que TDH superiores a 100 h (4,17 dias) proporcionaram maiores eficiências na remoção de DQO e DBO₅ que os de aproximadamente 60 h (2,5 dias) aplicados nas fases iniciais do experimento, no tratamento de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC), em SACs cultivados com taboa e alternantera. Esse bom desempenho dos SACs na remoção de DBO não deve ser associado a baixas TCOs aplicadas, já que, à exceção da de 66 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅, todas podem ser consideradas elevadas (U.S.EPA, 2000). Supõe-se, também, que além do TDH, a intensificação na formação de biofilme no meio suporte, proporcionada com o aumento nas TCOs, também possa ter aumentado a capacidade do sistema em remover DBO₅.

Utilizando-se da análise estatística (ANOVA, $P = 0,05$) para comparar o comportamento das forrageiras em relação à remoção de DBO_5 , entre SACs que operaram com mesma TCOs, verificou-se que as médias da relação entre a concentração efluente e a concentração afluenta (C/C_0) não apresentaram diferenças significativas ($P > 0,05$). Este fato demonstra que uma espécie não foi superior à outra, no que se refere à remoção de DBO_5 , quando comparados SACs vegetados operando com mesma TCO (Figura 1-A). Ao serem avaliados os valores de C/C_0 relativos à DBO_5 nos três SACs que foram submetidos a TCOs média de $130 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DBO_5 (CT-130, CF-130 e SV-130), cujos dados estão apresentados na Tabela 5 e Figura 1-A, verifica-se, também, com base na análise estatística, que não houve diferença significativa entre os SACs vegetados e o SAC sem vegetação.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, as médias de concentração de DQO efluente obtidas nos SACs que operaram com TCO média de $66 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (SAC CT-66 e SAC CF-66) foram mais altas que as médias obtidas nos SACs CT-130, CF-130, SV-130, CT-190 e CF-190. Acredita-se que as maiores eficiências de remoção de DQO obtidas nos SACs que receberam maiores TCOs (Tabela 4) estejam relacionadas com os mesmos fatores que proporcionaram comportamento semelhante em relação à remoção de DBO_5 , ou seja, o processo de filtração e a formação de maior biofilme na superfície do substrato-suporte. Na avaliação comparativa entre as forrageiras cultivadas nos SACs que operaram com mesma TCO, realizada por meio da análise estatística, verificou-se que não ocorreram diferenças significativas nos valores de C/C_0 relativos à DQO. Este fato indicou que, quando comparados SACs vegetados operando com mesma TCO, não houve superioridade de uma espécie em relação à outra, no que se refere à remoção de DQO (Figura 1-B).

Na Figura 1-B e Tabela 5, estão apresentados dados que demonstram o desempenho dos três SACs que operaram com TCO média de $130 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (CT-130, CF-130 e SV-130), em relação à DQO. Estes dados indicam que foram obtidos resultados muito semelhantes na remoção de DQO nos SACs, demonstrando não ter havido influência significativa da presença de plantas na eficiência de remoção de DQO, nos três SACs. Assim como verificado no caso da DBO_5 , todos os SACs também apresentaram valores elevados de eficiência na remoção de DQO, com média mínima de 84,7 % no SAC CT-66, máxima de 97,1 % no SAC CT-570 (Tabela 4) e de 94,4 % no SAC SV-130 (Tabela 5). Esses resultados podem ser atribuídos, principalmente, ao efeito do tempo de detenção hidráulica da água residuária nos SACs. Resultados semelhantes foram obtidos por BRASIL et al. (2005) que, ao utilizarem SACs cultivados com taboa no tratamento de esgoto doméstico, obtiveram remoções entre 81 e 85% na DQO, e por MATOS et al. (2010c) que, ao utilizarem SACs cultivados com taboa (*Typha latifolia* L.), *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. e capim-tifton-85 (*Cynodon dactylon* Pers.), obtiveram remoções médias de 89% na DQO de águas residuárias da suinocultura.

De maneira geral, os SACs que operaram com maiores TCOs apresentaram menores concentrações relativas (C/C_0) de ST, embora não tenham sido significativamente diferentes (Figura 1-C). Ao se comparar os valores de C/C_0 , no que se refere à concentração de ST no efluente dos SACs que operaram com mesma TCOs, verifica-se que não houve diferença significativa entre os desempenhos das duas forrageiras (Figura 1-C). O mesmo também pode ser verificado quando se comparam os SACs CT-130 e CF-130 com o SAC SV-130, ou seja, não houve diferença significativa na eficiência de remoção de ST, entre os SACs vegetados que operaram com TCOs de $130 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de DBO_5 e o SAC não vegetado (Tabela 5). Como a maior parte do ST da água residuária era composta por SDT, e os SACs são tipicamente menos eficientes na remoção dessa variável, pode-se compreender as, relativamente, baixas eficiências dos SACs no que se refere a essa avaliação. No entanto, como não foi possível fazer um balanço hídrico para quantificar as perdas e ganhos no líquido residente dos SACs, não se pode afirmar se realmente os sistemas foram pouco eficientes na remoção de ST, haja vista que a já comentada evaporação e evapotranspiração pode ter sido fator fundamental para que não se evidenciasse alta remoção de sólidos da água residuária. BRASIL e MATOS (2008), por exemplo, obtiveram porcentagens de água perdida em

relação à lâmina afluyente aplicada, em SACs instalados nas proximidades dos utilizados neste experimento, no tratamento de esgoto sanitário, que variaram de 11% a 27%, o que proporcionou considerável subestimativa na eficiência de remoção dos poluentes, quando calculada a partir de dados de concentração de afluyente e efluente.

Em relação à eficiência de remoção de SST (Figura 1-D), verifica-se que, tal como ocorreu para os STs, os SACs que operaram com maiores TCOs também apresentaram maior eficiência na remoção de SST. Tal resultado pode ser devido, como já comentado para DQO e ST, à baixa velocidade de escoamento da água residuária, o que proporcionou a sedimentação de parte do material particulado no meio.

As eficiências de remoção de SST da ARL estiveram na faixa de 50 a 89 %, inferiores aos valores obtidos por MATOS et al. (2010c), que foram de 85; 93; 90 e 89 %, em SACs cultivados com taboa, alternantera, tifton e SAC misto (cultivados com taboa, alternantera e tifton), respectivamente, no tratamento de águas residuárias de suinocultura, com TCO média de 154,8 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅, e por BRASIL et al. (2005), que obtiveram 91 % de eficiência na remoção desta variável, utilizando SAC cultivado com taboa, no tratamento de esgoto doméstico, com TCO_v de 116 a 210 g m³ d⁻¹ de DQO.

Quando se compara o desempenho dos SACs vegetados que operaram com mesma TCO, utilizando-se da análise estatística, verifica-se que não houve diferença significativa entre os SACs, no que se refere à concentração relativa de SST (Figura 1-D). Ao se avaliar a influência da presença de vegetação no processo de remoção de SST da ARL, por meio de comparação das concentrações relativas obtidas nos SACs CT-130, CF-130 e SV-130, verifica-se também que não houve diferença significativa no desempenho entre os SACs vegetados e o sem vegetação. Entretanto, de acordo com a Tabela 5, em termos de valores médios, os SACs CT-130 e CF-130 apresentaram, respectivamente, 64,56 % e 64,27 % de eficiência na remoção de SST, enquanto o SAC SV-130 apresentou 81,81 %. Esse resultado pode estar relacionado com a presença e o comportamento das raízes no meio suporte. Considerando que as raízes ocuparam grande parte dos espaços vazios nos primeiros 10 cm de profundidade, houve, então, tendência de se aumentar a velocidade de escoamento do líquido nos outros 20 cm restantes da profundidade e, conseqüentemente, maior arraste de sólidos em suspensão para fora dos SACs. Estima-se que esse comportamento poderá ser alterado com o tempo de operação dos SACs, à medida que as raízes se aprofundarem mais no substrato poroso e/ou houver maior acúmulo de sólidos (MATOS et al., 2010c), principalmente ao longo da profundidade da zona de entrada dos SACs vegetados. A maior perda de água por evapotranspiração nos SACs vegetados, observada por autores como BRASIL e MATOS (2008), proporcionando maior concentração de poluentes no efluente, também é fator que deve ter contribuído para que esses resultados tenham sido obtidos.

De maneira geral, ao se comparar o desempenho dos SACs vegetados, verifica-se que todos os SACs cultivados com capim-tifton 85 apresentaram maior valor médio de eficiência na remoção de NTK do que os SACs cultivados com capim-elefante (Figura 1-E). Entretanto, constata-se que apenas os tratamentos submetidos a TCOs de 66 kg ha⁻¹ d⁻¹ apresentaram valores médios de eficiência significativamente diferentes.

Os dados apresentados na Figura 1-E e na Tabela 5 confirmam o efeito positivo da presença do capim-tifton no processo de remoção de nitrogênio, quando se avaliam os tratamentos submetidos a TCOs de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹ (CT-130, CF-130 e SV-130) e constata-se que, no SAC cultivado com capim-tifton 85, foi obtido desempenho significativamente melhor, apresentando remoção média de 70 %, enquanto no SAC sem vegetação foram obtidos apenas 29 %. O melhor desempenho de SACs vegetados em relação aos não vegetados é decorrente da absorção deste nutriente pelas plantas e, possivelmente, pela presença de maior quantidade e diversidade de microrganismos nos SACs vegetados, proporcionando melhores condições de desenvolvimento a estes, como, por exemplo, maior estabilidade térmica e maior variedade e disponibilidade de alimentos. A maior quantidade e diversidade de microrganismos certamente potencializam os

processos de decomposição e transformação das diferentes formas de nitrogênio e, conseqüentemente, diversificam ainda mais os caminhos da remoção (ROSSMANN, 2011).

De modo geral, foram obtidas eficiências médias de remoção de NTK em torno de 51 a 70 % em SACs cultivados com o capim-tifton 85 e de 14 a 50 % nos cultivados com o capim-elefante. Os resultados obtidos nos SACs cultivados com capim-tifton 85 foram superiores aos obtidos por BRASIL et al. (2005), que obtiveram remoção de 57 % de N-total em SACs cultivados com taboa, com TDH de 3,8 dias (TCOs entre 26 e 48 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅), no tratamento de esgoto doméstico, e por MATOS et al. (2010c), que obtiveram remoções de 51; 61; 64 e 64 % de N-total ao cultivarem taboa, alternantera, tifton-85 e SAC misto (cultivados com taboa, alternantera e tifton-85), respectivamente, no tratamento de água residuária da suinocultura.

Avaliando-se os valores de concentração de afluente e efluente de P-total (Tabela 3), verifica-se que houve aumento na concentração desta variável nos SACs submetidos às menores TCOs. Na análise dos valores de concentração relativa de P-total, evidenciou-se pior desempenho do SAC cultivado com capim-elefante que no SAC não vegetado, na remoção desse nutriente (Figura 1-F). Esse resultado pode ser atribuído à intensiva evapotranspiração das plantas nos SACs cultivados, proporcionando menor grau de diluição desse poluente na ARL, já que foi concentrado pela perda de água no sistema.

O comportamento dos SACs CT-130, CF-130 e SV-130, em relação à remoção/retenção de P-total, é bastante similar ao que ocorreu na remoção/retenção de SST e demonstra a relação entre a remoção de fósforo e a retenção de SST. Como grande parte do P-total presente na ARL está associada ao material orgânico em suspensão, a remoção de SST proporciona também a remoção de P-total. Diante disto, a explicação para este comportamento pode ser a mesma atribuída à remoção/retenção de SST, ou seja, supõe-se que a presença das raízes ocupando grande parte dos espaços vazios dos primeiros 10 cm de profundidade ocasionou o aumento na velocidade de deslocamento do líquido nos outros 20 cm restantes da profundidade e, conseqüentemente, provocou maior arraste de sólidos em suspensão para fora dos SACs vegetados. No entanto, considerando que o sistema radicular do capim-tifton 85 conseguiu atingir maior profundidade que o do capim-elefante, acredita-se que este fato tenha contribuído para que não houvesse diferença significativa de desempenho na remoção de P-total entre os SACs CT-130 e SV-130.

Quando avaliado o comportamento dos SACs vegetados, que operaram com mesma TCO na remoção de K da ARL, verifica-se que não houve diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 1-G). Salienta-se também, que as espécies vegetais avaliadas foram bastante tolerantes às elevadas concentrações de potássio aportadas aos sistemas, não apresentando sintomas visuais de toxicidade.

Em relação ao efeito da presença das forrageiras nos SACs, verificou-se influência positiva do cultivo do capim-tifton 85 no processo de remoção de potássio (Figura 1-G), tendo sido o SAC CT-130, cultivado com este capim, significativamente mais eficiente na remoção de potássio que o SAC SV-130 (sem vegetação). Pode-se constatar que não foi satisfatória a eficiência dos SACs na remoção de potássio (valores de C/C₀ acima ou muito próximos de 1,0); entretanto, deve-se ponderar que, tal como no caso da remoção de SST e P-total, houve interferência do efeito da concentração do líquido residente nos SACs, promovido pelos, já comentados, processos de evapotranspiração e evaporação, prejudicando a obtenção dos resultados de eficiência real dos sistemas. Caso fossem utilizados os valores de carga de potássio afluente e efluente (massa de potássio aportada e extraída dos SACs por meio das vazões afluentes e efluentes, respectivamente) para a quantificação da eficiência dos sistemas, certamente seriam encontrados valores ainda maiores de eficiência para os SACs vegetados. A eficiência insatisfatória de potássio obtida neste trabalho contrapõe-se aos resultados obtidos por MATOS et al. (2010c), que obtiveram remoções médias, sem correção da perda de água, que variaram entre 29±22 % e 46±25 % do potássio contido em águas residuárias da suinocultura tratadas em SACs cultivados com taboa e alternantera, respectivamente, e por BRASIL et al. (2005), que obtiveram, também sem correção da perda de

água, eficiências médias de remoção de potássio que variaram de 23 a 52 %, em SACs cultivados com taboa, no tratamento de esgoto doméstico.

O sódio, por ser pouco removido pelas plantas (não é nutriente essencial) e por não formar complexos orgânicos (LO MONACO et al., 2009) e, por isso, não ser passível de remoção por retenção física de SST, foi pouco removido nos SACs. As concentrações relativas, avaliadas para SACs que receberam iguais TCOs, não foram significativamente diferentes, demonstrando influência nula da vegetação na remoção/retenção de sódio da ARL (Figura 1-H e Tabela 6), embora tenha havido tendência de os SACs cultivados apresentarem melhor desempenho na remoção/retenção dessa variável.

Segundo BRASIL et al. (2005), os fatores que mais contribuem para o insucesso do sistema na remoção de sódio são a grande solubilidade desse elemento químico, a baixa absorção pelas plantas e a baixa associação do cátion com o material orgânico, esse sim, eficientemente, retido por processos físicos nos SACs. Baixas eficiências na remoção de sódio (4 %) foram observadas pelos mesmos autores, em SACs cultivados com taboa no tratamento de esgoto doméstico, e por MATOS et al. (2010c), que obtiveram 18; 25; 18 e 24 % em SACs cultivados com taboa, alternantera, tifton e SAC misto (cultivados com taboa, alternantera e tifton 85), ambos no tratamento de água residuária de suinocultura.

CONCLUSÕES

Os SACs mostraram-se eficientes na remoção da DBO₅ (79 a 96 %), DQO (85 a 97 %), ST (31 a 37 %), SST (50 a 89 %) e nitrogênio (14 a 70 %), entretanto mostraram-se pouco eficientes na remoção de fósforo, potássio e sódio da água residuária de laticínios.

As duas forrageiras avaliadas apresentaram semelhante influência no processo de remoção de DBO₅, DQO, ST, SST, P-total, K e Na, quando comparados sistemas que operaram com mesma taxa de carga orgânica. Diferente influência no processo de remoção foi observada para o NTK, na mais baixa taxa de carregamento orgânico aplicada (66 ha⁻¹ d⁻¹ de DBO₅), condição que propiciou que se obtivesse maior remoção do poluente nos SACs cultivados com o capim-tifton 85.

O SAC não vegetado apresentou desempenho semelhante ao dos SACs vegetados na remoção de DBO₅, DQO, ST, SST e Na, enquanto o cultivado com capim-tifton foi mais eficiente na remoção de NTK.

REFERÊNCIAS

- APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association; WEF - Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21th. ed. Washington, 2005. 1.268p.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.13, n.3, p.323-328, jul./set. 2008.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.9, p.133-137, 2005. Suplemento.
- CHAGAS, R.C.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; LO MONACO, P.A.V.; ZAPAROLLI, B.R. Remoção de coliformes em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-amarelo (*Hemerocallis fava*). *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.20, n.02, p.142-150, mar./abr. 2012.
- EPA. Environmental Protection Agency. *Manual constructed wetlands for Municipal wastewater treatment*. EPA 625-R-99-010, US EPA ORD. Cincinnati, 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>> Acesso em: 20 jun. 2012.

FIA, F.R.L.; MATOS, A.T.; FIA, R.; LAMBERT, T.F.; MATOS, M.P. Remoção de nutrientes por *Typha latifolia* e *Cynodon spp.* cultivadas em sistemas alagados construídos. *Ambi-água*, Taubaté, v.6, n.1, p.77-89, 2011.

FIA, R.; MATOS, A. T.; MATOS, M. P.; ABREU, E. C.; FIA, F. R. L. Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema alagado construído: I - remoção de matéria orgânica. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1.191-1.202, nov./dez. 2010.

LO MONACO, P.A.V.; MATOS, A.T.; SARMENTO, A.P.; LOPES JÚNIOR, A.V.; LIMA, J.T. Desempenho de filtros constituídos por fibras de coco no tratamento de águas residuárias de suinocultura. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.17 n.6, p.473-480, nov./dez. 2009.

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 Ambi-Água*, Taubaté, v.3, n.1, p.43-53, 2008.

MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; BORGES, A.C.; MATOS, M.P. Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.15. n.01, p.83-92, jan./mar., 2010a.

MATOS, A.T.; ABRAHAO, S.S.; PEREIRA, O.G. Desempenho agrônômico de capim-napier (*Pennisetum purpureum*) cultivado em sistemas alagados construídos. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.19, n.5, set./out. 2011.

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*, Jaboticabal, v.30, n.3, p.518-526, maio/jun. 2010b.

MATOS, A.T.; FREITAS, W.S.; LO MONACO, P.A.V. Eficiência de sistemas alagados construídos na remoção de poluentes de águas residuárias da suinocultura. *Ambi-Água*, Taubaté, v.5, n.2, p.119-132, 2010c.

ROSSMANN, M. *Sistemas alagados construídos para tratamento de águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro: eficiência e caracterização das comunidades microbianas*. 2011. 77f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011, 77