

## ARTIGO TÉCNICO

### **TRATAMENTO DAS ÁGUAS DO PROCESSAMENTO DOS FRUTOS DO CAFEIEIRO EM FILTRO ANAERÓBIO SEGUIDO POR SISTEMA ALAGADO CONSTRUÍDO: I - REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA**

**RONALDO FIA<sup>1</sup>, ANTONIO T. DE MATOS<sup>2</sup>, MATEUS P. DE MATOS<sup>3</sup>,  
EDGAR C. ABREU<sup>4</sup>, FATIMA R. L. FIA<sup>5</sup>**

**RESUMO:** Seis sistemas de tratamento, compostos por três filtros anaeróbios com escoamento descendente, seguidos por seis Sistemas Alagados Construídos (SACs), tiveram suas condições operacionais avaliadas quando utilizados no tratamento da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC). Os filtros foram confeccionados em PVC (1,5 m de altura e 0,35 m de diâmetro) e preenchidos com brita nº 2. Os SACs foram constituídos por caixas de madeira (1,5 m de comprimento, 0,4 m de altura e 0,5 m de largura), sendo impermeabilizados e preenchidos com brita “zero”. A ARC teve o pH corrigido com cal até valores próximos a 7,0, e a concentração de nutrientes alterada, de forma a se obter uma relação DBO/N/P de 100/5/1. Em metade dos SACs foi plantado o azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), e na outra metade, aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb). Como resultado, observou-se que as espécies vegetais cultivadas nos SACs não influenciaram nas eficiências globais de remoção de poluentes pelos sistemas. Os sistemas que receberam as menores cargas orgânicas apresentaram as maiores eficiências de remoção de matéria orgânica, alcançando 78% para DQO e 70% para DBO. A remoção de SST foi superior a 70% em todos os sistemas avaliados, indicando a viabilidade da aplicação de filtro anaeróbio seguido por SACs no tratamento da ARC.

**PALAVRAS-CHAVE:** filtros anaeróbios, *wetlands* construídos, água residuária agroindustrial, matéria orgânica, café.

### **TREATMENT OF THE WASTEWATER OF COFFEE FRUIT PROCESSING IN ANAEROBIC FILTER SYSTEM FOLLOWED BY CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM: I - REMOVAL OF ORGANIC MATERIAL**

**ABSTRACT:** Six treatment systems, composed of three downflow anaerobic filters followed by six Constructed Wetlands (SACs), had their operating conditions evaluated when used in the treatment of wastewater from coffee fruit processing (ARC). The filters were made of PVC (1.5 m high and 0.35 m in diameter) and filled with n. 2 crushed stone. SACs were constructed of wood boxes (1.5 m long, 0.4 m high and 0.5 m wide) being sealed with an HDPE geomembrane and filled with “zero” crushed stone. The pH of the ARC was corrected with lime to values near 7.0 and nutrient concentration altered in order to obtain a BOD/N/P ratio equal to 500/5/1. In half of the SACs was planted ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) and in the other half oat (*Avena strigosa* Schreb). As a result, it was observed that the plant species grown in the SACs didn't affect the overall efficiencies of pollutant removal by the systems. The systems that received the lowest organic loading showed the highest efficiencies of removal of organic matter, reaching 78% for COD and 70% for BOD and the removal of TSS was higher than 70% in all systems studied, indicating the feasibility of applying anaerobic filter system followed by constructed wetland system in ARC treatment.

**KEYWORDS:** anaerobic filters, constructed wetlands, agroindustrial wastewater, organic matter, coffee.

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola e Ambiental, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia, UFLA, ronaldofia@deg.ufla.br.

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, atmatos@ufv.br.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Agrícola, UFV, mateus.matos@ufv.br.

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Agrícola, UFV, edgar.abreu@ufv.br.

<sup>5</sup> Eng<sup>a</sup> Agrícola, Profa. Adjunta, Departamento de Engenharia, UFLA, fatimarlf@deg.ufla.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 28-5-2010

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 6-10-2010

## INTRODUÇÃO

A atividade de lavagem e descascamento/despolpa de frutos do cafeeiro, necessária para a redução do custo de secagem e para a melhoria da qualidade de bebida, é geradora de grandes volumes de resíduos sólidos e líquidos, ricos em material orgânico e inorgânico que, se dispostos sem tratamento no ambiente, podem causar grandes problemas ambientais.

Com a redução na disponibilidade e qualidade das águas superficiais, tem sido proposta a utilização dos recursos hídricos de forma racional, reduzindo ao máximo a utilização das águas no processo produtivo. Na agroindústria, isto não é diferente e, na procura pela redução no volume de água gasto no processamento dos frutos do cafeeiro, tem sido utilizada, por alguns produtores, a recirculação da mesma no processo. Com a recirculação da água, o consumo pode diminuir para aproximadamente um litro para cada litro de fruto processado, cerca de um quarto do que é gasto quando a recirculação não é feita (MATOS et al., 2006). No entanto, há aumento na concentração de poluentes nestas águas, o que pode dificultar seu tratamento antes do lançamento no ambiente.

Como forma de disposição final das águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC), recirculadas ou não, no solo, pode ser feita utilizando-se de técnicas tais como a fertirrigação da cultura do próprio cafeeiro (LO MONACO et al., 2007) e o tratamento por escoamento superficial com a produção de gramíneas forrageiras (MATOS et al., 2005). O tratamento da ARC tem sido feito, também, em reatores anaeróbios (DINSDALE et al., 1996; LUIZ, 2007; BRUNO & OLIVEIRA, 2008) ou utilizando-se de lagoas de estabilização. Embora os processos anaeróbios de tratamento apresentem satisfatória remoção de matéria orgânica biodegradável, com relativamente baixos custos, às vezes os seus efluentes não têm atendido às exigências da legislação ambiental, requerendo, nesses casos, pós-tratamento. Como pós-tratamentos, têm sido propostos os Sistemas Alagados Construídos (SACs). FIA (2008) obteve desempenho satisfatório no pós-tratamento da ARC em SACs, obtendo eficiências de 85 e 63% para DQO e DBO, respectivamente.

Diante dos resultados positivos obtidos por FIA (2008), no presente trabalho, objetivou-se estudar o desempenho de sistemas de tratamento compostos por filtros anaeróbios seguidos de sistemas alagados construídos (SACs), submetidos a diferentes cargas orgânicas, no tratamento das águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Com este intuito, foram confeccionados três filtros anaeróbios, de escoamento descendente, utilizando-se de segmentos de tubo de PVC, de 0,35 m de diâmetro e comprimento de 1,5 m, com capacidade total de 139,5 L. Essas unidades foram preenchidas com meio suporte (brita de granito-gnaiss nº 2), perfazendo-se colunas de 1,2 m de altura. Antes da aplicação da ARC, esses filtros operaram com esgoto doméstico durante um período de três meses, em trabalho conduzido por FIA et al. (2009a).

Os efluentes dos três filtros anaeróbios (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>) foram lançados, respectivamente, em três pares de SACs (SAC<sub>1</sub> e SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub> e SAC<sub>4</sub>, SAC<sub>5</sub> e SAC<sub>6</sub>) de escoamento subsuperficial horizontal, construídos em escala-piloto, constituídos por caixas de madeira de pínus (0,4 m de altura x 0,5 m de largura x 1,5 m de comprimento), impermeabilizadas por geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade), posicionadas sobre o solo em declividade de 0,01 m m<sup>-1</sup>. Como meio suporte, utilizou-se brita nº “zero” (diâmetro D-60 = 7,0 mm e volume de vazios inicial de 0,491 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). Os SACs foram preenchidos com a brita até a altura de 0,35 m, deixando-se uma borda livre (não saturada) de 0,05 m, já que o nível d’água foi mantido em 0,30 m. Nos SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>3</sub> e SAC<sub>5</sub>, foi plantado o azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), e nos SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>4</sub> e SAC<sub>6</sub>, a aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb). Estas duas espécies, além de serem forrageiras de inverno, período no qual há produção da ARC, apresentaram bom desempenho agrônomo quando

cultivadas em rampas vegetadas para o tratamento da ARC por escoamento superficial (MATOS et al., 2005). O azevém foi plantado por meio de sementes ( $30 \text{ kg ha}^{-1}$ ) aplicadas a lanço sobre o leito de brita. A aveia foi plantada a lanço ( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ ); no entanto, devido à dificuldade na germinação, foi feito o transplante aos 15 dias após a germinação ( $60 \text{ plantas m}^{-2}$ ). Após a semeadura, manteve-se o nível de água a 0,05 m abaixo da superfície do leito de brita. No entanto, as sementes permaneceram umedecidas, o que foi proporcionado com a ascensão capilar da água através do leito de brita.

Após 15 dias de implantação do sistema, iniciou-se a aplicação, nos SACs, dos efluentes de filtros anaeróbios, os quais foram alimentados com ARC diluída, com correção de pH até aproximadamente 7,0, com cal hidratada, e com correção nutricional com a adição de ureia e superfosfato simples, para se obter uma relação DBO/N/P de 100/5/1 (METCALF & EDDY, 2003). A ARC foi proveniente do Sítio Jatobá, propriedade agrícola situada a 12 km da cidade de Viçosa, onde o consumo médio de água era de  $2,5 \text{ L L}^{-1}$  de grãos processados, pois havia recirculação da água no processo. Os grãos eram lavados e descascados/despulpados, tendo parte da polpa removida. As características da ARC bruta antes da diluição e aplicação nos filtros e, posteriormente, nos SACs estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Valores médios das principais características da ARC bruta utilizada durante o período de operação do sistema. **Average values of the principal characteristics of the untreated ARC used during the operation of the system.**

pH	DQO	DBO	ST	SVT	SST	SSV	
	mg L <sup>-1</sup>						
ARC	3,44±0,16	47.071±9.044	13.471±3.999	17.605±1.753	15.048±1.849	1.885±618	1.801±598

DQO - Demanda Química de Oxigênio, DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio, ST - sólidos totais, SVT - sólidos voláteis totais, SST - sólidos suspensos totais, SSV - sólidos suspensos voláteis.

Os valores médios e o desvio-padrão das características operacionais dos filtros anaeróbios e dos SACs estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Condições operacionais dos filtros anaeróbios e dos sistemas alagados construídos. **Operational conditions of anaerobic filters and constructed wetlands.**

Variáveis	Q	TDH	COV <sub>U</sub>	COV <sub>T</sub>	TCO <sub>A-DBO</sub>	TCO <sub>A-DQO</sub>
F <sub>1</sub>	0,157±0,021	10,2±1,3	1,91±0,29	0,91±0,14	-	-
SAC <sub>1</sub>	0,068±0,008	42,1±5,1	-	-	464±126	653±470
SAC <sub>2</sub>	0,071±0,009	40,2±5,2	-	-	494±120	686±447
F <sub>2</sub>	0,155±0,026	10,4±1,5	3,66±0,62	1,74±0,29	-	-
SAC <sub>3</sub>	0,068±0,009	42,1±5,4	-	-	667±172	1.297±305
SAC <sub>4</sub>	0,072±0,009	39,3±4,8	-	-	660±163	1.260±130
F <sub>3</sub>	0,156±0,022	10,3±1,5	4,89±1,12	2,33±0,53	-	-
SAC <sub>5</sub>	0,066±0,008	43,1±4,5	-	-	750±164	1.394±426
SAC <sub>6</sub>	0,066±0,006	42,6±3,6	-	-	828±201	1.531±444

Q - vazão ( $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ); TDH - tempo de detenção hidráulica (h); COV<sub>U</sub> - carga orgânica volumétrica utilizando o volume de poros do filtro ( $\text{kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO); COV<sub>T</sub> - carga orgânica volumétrica utilizando o volume total do filtro ( $\text{kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO); TCO<sub>A</sub> - taxa de carga orgânica tomada com base na área superficial ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) e na DBO e DQO. Foram coletadas cinco amostras em cada fase para cálculo da COV e TCO<sub>A</sub>; a Q e o TDH foram monitorados diariamente.

O experimento foi monitorado durante 55 dias, compreendendo os meses de agosto e setembro, período no qual foram realizadas cinco amostragens, em que foram coletadas amostras afluentes e efluentes dos filtros e efluentes dos SACs para avaliação do pH; DBO, pelo método iodométrico; DQO, pelo método do refluxo aberto; sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV), pelo método gravimétrico (APHA et al., 2005). Nos afluentes e efluentes dos filtros, foram avaliados a

alcalinidade a bicarbonato (AB) e os ácidos voláteis totais (AVT), tal como descrito por RIPLEY et al. (1986).

Considerando os sistemas de tratamento (F+SAC), as variáveis DQO, DBO, ST e SST foram analisadas estatisticamente no esquema fatorial 2 x 3 (2 espécies vegetais e 3 taxas de carga orgânica) no delineamento em blocos casualizados (DBC), com 5 repetições (repetições no tempo). Procedeu-se à análise de variância, e as médias foram comparadas, utilizando-se do teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema operou sob temperatura ambiente, que variou de 13,3 a 23,2°C, com temperatura média do período de 17,4±2,2°C, sendo esta faixa de temperatura considerada psicrófila para os microrganismos. Com relação à ocorrência de chuvas, foi registrada durante a fase experimental uma lâmina de 138,8 mm, a que não foi capaz de influenciar nos resultados experimentais, por não ser coincidente com os períodos de amostragem da água residuária em tratamento.

Na Tabela 3, estão apresentados os valores médios de pH, DQO, DBO, ST, STV, SST e SSV afluentes (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>) e efluentes dos filtros (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>) e dos SACs (SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub>, SAC<sub>4</sub>, SAC<sub>5</sub> e SAC<sub>6</sub>).

TABELA 3. Valores médios e desvio-padrão de pH, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV), afluente (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>) e efluente dos filtros anaeróbios (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>) e dos sistemas alagados construídos (SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub>, SAC<sub>4</sub>, SAC<sub>5</sub>, SAC<sub>6</sub>). **Mean values and standard deviation of pH, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total solids (TS), total volatile solids (TVS), total suspended solids (TSS) and volatile suspended solids (VSS) influent (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>) and effluent of anaerobic filters (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>) and constructed wetlands (SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub>, SAC<sub>4</sub>, SAC<sub>5</sub>, SAC<sub>6</sub>).**

	pH	DQO	DBO	ST	SVT	SST	SSV
		mg L <sup>-1</sup>					
C <sub>1</sub>	6,52±0,25	1.856±1.326	928±290	665±144	388±126	93±52	90±51
F <sub>1</sub>	6,42±0,13	724±523	513±145	563±214	229±167	31±12	24±9
SAC <sub>1</sub>	6,91±0,23	343±176	263±108	549±164	195±95	17±3	9±3
SAC <sub>2</sub>	7,00±0,27	353±219	370±176	599±116	216±60	14±7	9±7
C <sub>2</sub>	6,63±0,25	2.246±1.110	1.148±463	1.303±207	806±102	80±37	75±36
F <sub>2</sub>	6,33±0,31	1.330±236	680±106	1.119±139	571±183	51±16	47±16
SAC <sub>3</sub>	7,04±0,26	455±189	425±82	821±134	341±120	23±13	18±11
SAC <sub>4</sub>	7,16±0,27	583±243	556±194	849±230	327±96	20±10	13±9
C <sub>3</sub>	6,46±0,12	2.835±1.817	1.422±505	1.698±409	904±167	93±32	83±30
F <sub>3</sub>	6,24±0,20	1.633±502	876±181	1.412±128	706±127	50±16	45±17
SAC <sub>5</sub>	7,06±0,31	833±233	738±203	1.023±134	420±115	22±9	13±8
SAC <sub>6</sub>	7,06±0,26	998±299	827±241	1.094±161	443±160	26±9	19±7

Houve tendência de redução nos valores de pH nos efluentes dos filtros, quando comparados aos obtidos nos afluentes; no entanto, os valores mantiveram-se dentro da faixa considerada adequada para a digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007). BRUNO & OLIVEIRA (2008) verificaram redução acentuada nos valores de pH dos efluentes de reatores UASB em dois estágios, no tratamento da ARC, quando foram aplicadas COV<sub>T</sub> de 5,8 e 3,6 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>, sendo a redução mais acentuada na maior COV<sub>T</sub> aplicada. Neste trabalho, com a aplicação de COV<sub>T</sub> de 2,33 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>,

não se verificou redução nos valores de pH de modo a reduzir a eficiência dos filtros. Em relação aos SACs, verificou-se tendência de aumento nos valores de pH.

### Avaliação dos filtros anaeróbios

Observa-se, na Figura 1, que houve tendência de aumento da alcalinidade bicarbonato (AB) a partir do quadragésimo dia, período necessário para ocorrer adaptação da biomassa à ARC. O mesmo comportamento não foi observado para os ácidos orgânicos voláteis (AVT). Em relação a esta variável, apenas F<sub>1</sub> apresentou tendência de redução na concentração de ácidos no efluente, quando comparado aos valores obtidos no afluente; entretanto, os valores afluentes foram muito próximos aos valores apresentados pelos efluentes na última amostragem.

Apesar da manutenção do pH afluente entre 6,2 e 6,5, o afluente não apresentou valores adequados de alcalinidade e também não houve produção adequada de AB nos filtros, nem mesmo em F<sub>1</sub>, que recebeu a menor COV<sub>T</sub>, como observado por BRUNO & OLIVEIRA (2008), provavelmente em razão da adição do composto, aplicado para correção do pH da ARC. Torna-se importante ressaltar que a opção pela cal, como corretivo de pH neste trabalho, também foi motivada pelo efeito antagonico do cálcio em relação ao potássio presente em elevadas concentrações na ARC, conforme observado por DAOMING & FORSTER (1993). Além disso, a adição de compostos ricos em sódio, para correção do pH, poderia inviabilizar o aproveitamento agrícola dos efluentes dos sistemas de tratamento em fertirrigação.

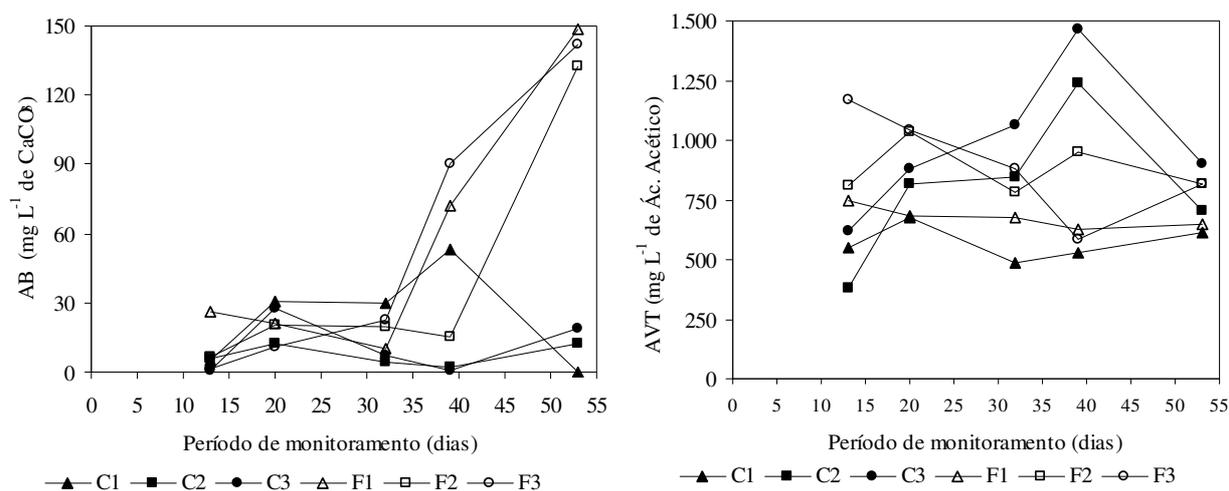


FIGURA 1. Concentrações de alcalinidade bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) afluente (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>) e efluente dos filtros anaeróbios (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>).  
**Concentrations of bicarbonate alkalinity (BA) and total volatile acids (TVA) influent (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>) and effluent of anaerobic filters (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>).**

DINSDALE et al. (1996), operando reatores anaeróbios de 5 L, com COV<sub>T</sub> de 1,3 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> de DQO, nas faixas de temperatura mesofílica e termofílica, tratando águas residuárias da produção de café instantâneo e fazendo a correção de pH com Ca(OH)<sub>2</sub>, observaram decréscimos na produção de metano a partir do trigésimo dia de operação, a qual foi acompanhada do aumento da concentração de AVT, de 500 para 2.000 mg L<sup>-1</sup>. Os autores afirmaram que, mesmo com o pH em torno de 6,8, por um longo período, o sistema não se recuperou. Em um segundo estudo, utilizando-se das mesmas variáveis (COV<sub>T</sub> e TDH), mas com suplementação de nitrogênio e fósforo na proporção de 400:7:1 e solução de nutrientes, o sistema de tratamento manteve-se estável durante todo o período do experimento, com concentrações de AVT na faixa de 100 mg L<sup>-1</sup>.

As variações na vazão afluente (dados não apresentados) provocaram a instabilidade do sistema. Desta forma, foram obtidas eficiências de remoção variáveis durante o experimento (Tabela 4). Durante o período de monitoramento, as remoções médias de DBO foram semelhantes para os filtros (P<0,05). No entanto, constatou-se diferença estatística na remoção de DQO, sendo a

eficiência obtida em  $F_1$ , o qual recebeu  $COV_U$  de  $1,91 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO, diferente daquela apresentada nos demais filtros ( $P < 0,05$ ).

PRADO & CAMPOS (2008), tratando ARC em reator UASB com TDH variando entre 8 e 69 horas e  $COV_U$  de  $0,14$  a  $20,3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO, obtiveram remoção de DBO e DQO entre 45 e 95% e 33 e 93%, respectivamente.

DINDALE et al. (1997), utilizando reator UASB para o tratamento das águas residuárias da produção de café instantâneo, removeram, ao aplicar  $COV_T$   $5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO e TDH de 48 h, 78% da DQO em condições mesofílicas e 70% em condições termofílicas. BRUNO & OLIVEIRA (2008), ao aplicarem  $COV_T$  de  $5,8 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO em reator UASB de primeiro estágio, obtiveram eficiência de remoção de DQO de 55%. No entanto, esses autores trabalharam em laboratório, ambiente menos suscetível às variações climáticas.

LUIZ (2007) avaliou reator anaeróbio de leito fixo, preenchido com brita, operado sob temperatura ambiente, obtendo eficiências de remoção de DQO e DBO de 54 e 58% ao aplicar  $COV_U$   $1,67 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO, após 80 dias de alimentação nestas condições. Ao aumentar a  $COV_U$  aplicada para  $3,35 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , obteve aumento na eficiência de tratamento do sistema (72% e 76%, para DQO e DBO, respectivamente).

TABELA 4. Valores médios da eficiência de remoção (%) da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) durante o período de operação dos filtros anaeróbios ( $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ ). **Average values of the removal efficiencies (%) of chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total solids (TS) and total suspended solids (TSS) during the operation of anaerobic filters ( $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ ).**

Variáveis	$F_1$	$F_2$	$F_3$
DQO	60,0 <sup>a</sup>	33,6 <sup>b</sup>	33,9 <sup>b</sup>
DBO	43,8 <sup>a</sup>	31,2 <sup>a</sup>	34,4 <sup>a</sup>
ST	16,7 <sup>a</sup>	13,1 <sup>a</sup>	13,6 <sup>a</sup>
SST	54,9 <sup>a</sup>	31,3 <sup>b</sup>	44,2 <sup>ab</sup>

Dentro de uma mesma linha, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade. Os filtros  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  receberam  $COV_U$  de 1,91; 3,66 e  $4,89 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO, respectivamente.

A perda de sólidos verificada pelas baixas eficiências de remoção apresentadas pelos filtros pode ser justificada pela lavagem de biomassa, em razão de variações repentinas de carga hidráulica e pela menor decantabilidade dos sólidos, sob baixa temperatura, dado que a viscosidade do fluido mantém-se alta, o que acarreta menor velocidade de sedimentação da biomassa produzida, especialmente de microrganismos com crescimento suspenso (LETTINGA et al., 2001). Apesar de a biomassa ficar aderida ao meio suporte dos filtros anaeróbios, há formação de lodo intersticial, o qual pode ser facilmente arrastado do sistema quando da variação repentina da carga hidráulica.

Houve significativa redução na concentração de SST da ARC afluente aos filtros, causada pela adição da cal, o que levou à coagulação/floculação do material particulado em suspensão, proporcionando a sedimentação dessas partículas e consequente clarificação da ARC, ainda nos tanques de distribuição desta aos filtros, o que pode ter proporcionado maior eficiência de remoção dos SST, em relação aos STs. Neste caso, os STs passaram a ser formados, principalmente, pelos sólidos dissolvidos.

Segundo LETTINGA et al. (2001), os filtros anaeróbios possuem desempenho razoável no que se refere à eficiência de remoção de sólidos suspensos, quando são aplicadas pequenas cargas de sólidos.

LUIZ (2007), operando filtros anaeróbios para tratamento de ARC e TDH médio de 36,2 h, obteve menores eficiências médias de remoção de ST (17 a 31%), enquanto, em relação a SST, a variação na remoção média foi de 44 a 54%, nas duas últimas fases do seu experimento. Valores

superiores aos obtidos neste trabalho também foram obtidos por BRUNO & OLIVEIRA (2008). Esses autores obtiveram entre 70 e 91% de remoção de SST no reator UASB de primeiro estágio.

Além da variabilidade climática, que os filtros anaeróbios foram expostos, operando sob temperatura ambiente, outro fator que pode ter reduzido as eficiências de remoção de matéria orgânica e sólidos foram as maiores COVs utilizadas, quando comparadas às aplicadas por LUIZ (2007), DINDALE et al. (1997) e BRUNO & OLIVEIRA (2008).

### Avaliação dos sistemas alagados construídos

As eficiências médias de remoção de matéria orgânica nos SACs foram relativamente baixas (Tabela 5), quando comparadas às obtidas em sistemas de tratamento de efluentes domésticos e outras águas residuárias agroindustriais. BRASIL et al. (2005) obtiveram remoção de DQO entre 87 e 90% no tratamento de efluentes domésticos pré-tratados em tanque séptico. No entanto, a maior carga orgânica aplicada por BRASIL et al. (2005) foi  $118 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DBO, valor este quatro a sete vezes inferior ao aplicado neste trabalho.

TABELA 5. Valores médios da eficiência de remoção (%) da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) durante o período de operação dos sistemas alagados construídos (SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub>, SAC<sub>4</sub>, SAC<sub>5</sub>, SAC<sub>6</sub>). **Average values of the removal efficiencies (%) of chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total solids (TS) and total suspended solids (TSS) during the operation of constructed wetlands (SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>3</sub>, SAC<sub>4</sub>, SAC<sub>5</sub>, SAC<sub>6</sub>).**

Variáveis	SAC <sub>1</sub>	SAC <sub>2</sub>	SAC <sub>3</sub>	SAC <sub>4</sub>	SAC <sub>5</sub>	SAC <sub>6</sub>
DQO	44,9 <sup>a</sup>	40,8 <sup>a</sup>	64,2 <sup>b</sup>	55,9 <sup>b</sup>	47,7 <sup>a</sup>	38,4 <sup>c</sup>
DBO	49,1 <sup>a</sup>	29,4 <sup>b</sup>	34,5 <sup>b</sup>	15,6 <sup>c</sup>	13,0 <sup>c</sup>	3,6 <sup>c</sup>
ST	-4,4 <sup>a</sup>	-9,1 <sup>a</sup>	36,0 <sup>b</sup>	23,3 <sup>b</sup>	27,3 <sup>b</sup>	22,1 <sup>b</sup>
SST	33,4 <sup>a</sup>	46,6 <sup>a</sup>	55,5 <sup>a</sup>	60,8 <sup>a</sup>	55,2 <sup>a</sup>	48,6 <sup>a</sup>

Dentro de uma mesma linha, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade. Os SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>3</sub> e SAC<sub>5</sub> foram cultivados com azevém e receberam 653; 1.297 e 1.394  $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DQO. Os SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>4</sub> e SAC<sub>6</sub> foram cultivados com aveia e receberam 686; 1.260 e 1.531  $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DQO, respectivamente.

Ao avaliar o desempenho de SACs operados com águas residuárias do processamento do couro, CALHEIROS et al. (2007) obtiveram eficiências de remoção entre 41 e 73% para DQO e de 41 a 58% para DBO, com a aplicação de cargas orgânicas que variaram de 332 a  $1.602 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DQO. MASBOUGH et al. (2005) obtiveram remoção de 51 a 63% na DBO, no tratamento de lixívia de celulose, em sistemas alagados com TDH de 7 dias e DBO variando de 1.700 a  $3.460 \text{ mg L}^{-1}$ .

Os autores observaram maiores eficiências na remoção de poluentes naquelas células que receberam a lixívia com correção de pH (pH = 6,0) e adição de nutrientes (N, P e K). TAO et al. (2006), tratando lixívia da indústria de celulose, concluíram que  $0,4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  de DQO ( $1.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DQO, aproximadamente) é a carga máxima a ser aplicada em sistemas alagados construídos, sem causar inibição da microbiota. Os autores ainda concluíram que, com o aumento do TDH, poderia ser obtido aumento na eficiência de remoção de matéria orgânica da água residuária.

SOHSALAM & SIRIANUNTAPIBOON (2008) aplicaram, em sistemas alagados construídos com cargas de 612 a  $1.213 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DBO, e obtiveram eficiências médias de 74 a 89% e 15 a 68%, respectivamente, na remoção de DBO e DQO de águas residuárias do processamento da cana-de-açúcar. FIA (2008) obteve remoção de DQO e DBO da ordem de 85 e 63% em SAC que recebeu  $1.500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de DQO proveniente da ARC pré-tratada em filtros anaeróbios.

As menores remoções de DBO, quando comparada às de DQO, podem estar relacionadas às variações na temperatura na água residuária em tratamento, o que pode afetar o desempenho dos

sistemas alagados, já que o mesmo tende a diminuir com a redução na temperatura do líquido (KADLEC & REDDY, 2001). Além disso, o maior desenvolvimento do azevém (FIA et al., 2009b) em relação à aveia parece ter influenciado na remoção de DQO e DBO (SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>3</sub> e SAC<sub>5</sub> em relação aos SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>4</sub> e SAC<sub>6</sub>, respectivamente), apesar de alguns não apresentarem diferença estatisticamente significativa.

A eficiência de remoção de SST nos SACs foi inferior aos 91% obtidos por BRASIL et al. (2005), no tratamento do efluente primário de esgoto doméstico. MATOS et al. (2008), no tratamento de efluentes do processamento do leite em SACs, obtiveram, em média, 70% de eficiência na remoção de ST e atribuíram esta elevada eficiência ao fato de a maior parte (73%) dos STs no efluente ser constituída por sólidos dissolvidos, condição semelhante à ocorrente neste trabalho. No entanto, as mesmas eficiências de remoção de ST não foram obtidas neste trabalho. Nos SAC<sub>1</sub> e SAC<sub>2</sub>, houve arraste mais intenso de partículas, provavelmente em função das variações bruscas de vazão, o que provocou eficiências médias de remoção negativas. Os sistemas alagados são eficientes na redução de sólidos suspensos, por meio de processos ocorridos no meio granular: sedimentação nos interstícios, retenção por restrição ao escoamento (filtração) e adesão aos grânulos do material-suporte, funcionando como filtro horizontal (USEPA, 2000).

### Avaliação global do sistema de tratamento

A eficiência global do sistema (F+SAC) pode ser considerada satisfatória para remoção de matéria orgânica (Tabela 6), principalmente para aqueles sistemas que receberam as menores cargas orgânicas (F<sub>1</sub>+SAC<sub>1</sub> e F<sub>1</sub>+SAC<sub>2</sub>). Em relação aos sólidos, os sistemas mostraram-se eficientes apenas para remoção de SST. Provavelmente, devido às menores cargas de SST aplicadas, quando comparadas às de ST. Além disso, a maior parte dos SSTs apresentou-se na forma orgânica (SSV) (Tabela 1), o que pode ter facilitado o processo de degradação.

TABELA 6. Valores médios da eficiência global de remoção (%) da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) durante o período de operação dos sistemas compostos por F+SAC. **Average values of overall efficiency of removal (%) of chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total solids (TS) and total suspended solids (TSS) during the operation of anaerobic filter+constructed wetland system (F+SAC).**

Variáveis	F <sub>1</sub> +SAC <sub>1</sub>	F <sub>1</sub> +SAC <sub>2</sub>	F <sub>2</sub> +SAC <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> +SAC <sub>4</sub>	F <sub>3</sub> +SAC <sub>5</sub>	F <sub>3</sub> +SAC <sub>6</sub>
DQO	78,3 <sup>a</sup>	79,5 <sup>a</sup>	75,8 <sup>ab</sup>	70,3 <sup>ab</sup>	63,4 <sup>b</sup>	57,9 <sup>b</sup>
DBO	70,8 <sup>a</sup>	60,9 <sup>ab</sup>	65,5 <sup>ab</sup>	48,8 <sup>b</sup>	42,7 <sup>b</sup>	37,7 <sup>b</sup>
ST	16,5 <sup>a</sup>	8,1 <sup>a</sup>	44,3 <sup>b</sup>	32,6 <sup>b</sup>	36,2 <sup>b</sup>	31,2 <sup>b</sup>
SST	75,3 <sup>a</sup>	84,7 <sup>a</sup>	70,2 <sup>a</sup>	71,1 <sup>a</sup>	76,5 <sup>a</sup>	71,9 <sup>a</sup>

Dentro de uma mesma linha, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade. Os filtros F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub> receberam COV<sub>U</sub> de 1,91; 3,66 e 4,89 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> de DQO, respectivamente. Os SAC<sub>1</sub>, SAC<sub>3</sub> e SAC<sub>5</sub> foram cultivados com azevém e receberam 653; 1.297 e 1.394 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> de DQO. Os SAC<sub>2</sub>, SAC<sub>4</sub> e SAC<sub>6</sub> foram cultivados com aveia e receberam 686; 1.260 e 1.531 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> de DQO, respectivamente.

Verificou-se que as cargas orgânicas aplicadas neste trabalho estão em conformidade com aquelas encontradas na literatura para o tratamento de águas residuárias provenientes da cadeia produtiva do café, em reatores anaeróbios (BRUNO & OLIVEIRA, 2008; PRADO & CAMPOS, 2008; LUIZ, 2007; DINSDALE et al., 1996). Entretanto, em relação às cargas aplicadas aos SACs, estas foram bem superiores às cargas recomendadas para o tratamento de efluentes domésticos que, segundo USEPA (2000), deve variar de 60 a 133 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> de DBO, mas em conformidade com os autores que avaliaram o tratamento de águas residuárias que apresentam compostos recalcitrantes como a ARC (MASBOUGH et al., 2005; TAO et al., 2006; CALHEIROS et al., 2007; SOHSALAM & SIRIANUNTAPIBOON, 2008). Assim, acredita-se que o aumento do TDH nos SACs poderia aumentar, ainda mais, a eficiência de remoção de poluentes da ARC, além de baixar

a velocidade de arraste dos STs. BILLORE et al. (2001) demonstraram a aplicabilidade de SACs no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios utilizados no tratamento de efluentes de destilaria, que apresentavam elevada concentração de matéria orgânica (2.500 mg L<sup>-1</sup> de DBO e 14.000 mg L<sup>-1</sup> de DQO) e nutrientes, além de compostos fenólicos. O sistema operou com TDH de 14,4 dias, condição que propiciou a obtenção de eficiências de 85; 64 e 42% na remoção de DBO, DQO e ST, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos, para o tratamento da ARC em SACs, observa-se que há necessidade de mais estudos para a determinação de variáveis importantes para o adequado dimensionamento dos sistemas. No entanto, os dados até aqui obtidos indicam a potencial aplicação de sistemas conjugados, formados por filtros anaeróbios e sistemas alagados construídos, no tratamento da ARC.

## CONCLUSÕES

Utilizando o sistema de tratamento com filtros anaeróbios de escoamento descendente seguidos por sistemas alagados construídos, foi possível obter eficiências de remoção de DQO, DBO e SST acima de 55; 35 e 70%, respectivamente. As espécies vegetais cultivadas nos SACs não influenciaram nas eficiências globais de remoção de poluentes pelos sistemas. Os sistemas que receberam as menores cargas orgânicas (COV<sub>U</sub> de 1,91 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> de DQO e TCO<sub>A</sub> inferior a 700 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> de DQO) apresentaram as maiores eficiências de remoção de matéria orgânica, alcançando 78% para DQO (F<sub>1</sub>+SAC<sub>1</sub> e F<sub>1</sub>+SAC<sub>2</sub>) e 70% para DBO (F<sub>1</sub>+SAC<sub>1</sub>), indicando a viabilidade da aplicação do sistema F+SAC no tratamento das águas residuárias do processamento dos frutos do café.

## AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Bolsa de Pós-Doutorado) e ao CNPq, pelo apoio financeiro e bolsa concedidos.

## 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.
- BILLORE, S.K.; SINGH, N.; RAM, H.K.; SHARMA, J.K.; SINGH, V.P.; NELSON, R.M.; DOSS, P. Treatment of molasses based distillery effluent in a constructed wetland in central India. *Water Science and Technology*, Oxford, v.44, n.11-12, p.441-448, 2001.
- 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*, Campina Grande, v.9, p.133-137, 2005.
- BRUNO, M.; OLIVEIRA, R.A. Tratamento anaeróbio de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores UASB em dois estágios. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.28, n.2, p.364-377, 2008.
- CALHEIROS, C.S.C.; RANGEL, A.O.S.S.; CASTRO, P. M. L. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, New York, v.41, p.1.790-1.798, 2007.
- CHERNICHARO, C.A.L. *Reatores anaeróbios*. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- DAOMING, S.; FORSTER, C.F. An examination of the start-up of a thermophilic upflow sludge blanket reactor treating a synthetic coffee waste. *Environmental Technology*, London, v.14, p.965-972, 1993.

- DINSDALE, R.M.; HAWKES, F.R.; HAWKES, D.L. The mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of coffee waste containing coffee grounds. *Water Research*, New York, v.30, n.2, p.371-377, 1996.
- DINSDALE, R.M.; HAWKES, F.R.; HAWKES, D.L. Comparison of mesophilic and thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactors treating instant coffee production wastewater. *Water Research*, New York, v.31, n.1, p.163-169, 1997.
- FIA, R. *Desempenho de sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro*. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2008.
- FIA, R.; SCHUERY, F.C.; MATOS, A.T.; FERRES, G.C.; OLIVEIRA, T.F. Avaliação comparativa entre filtros anaeróbios com escoamento ascendente e descendente afogado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro/Petrolina. *Anais...* Juazeiro/Petrolina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009a. 1 CD-ROM.
- FIA, R.; MATOS, A.T.; MATOS, M.P.; LAMBERT, T.F.; ABREU, E.C.; FIA, F.R.L. Desempenho agrônômico de forrageiras cultivadas em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6., 2009, Vitória. *Anais...* Vitória: EMBRAPA, 2009b.
- KADLEC, R.H.; REDDY, K.R. Temperature effects in treatment wetlands. *Water Environment Research*, Alexandria, v.73, p.543-547, 2001.
- LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, Amsterdam, v.19, n.9, p.363-370, 2001.
- LO MONACO, P.; MATOS, A.T.; MARTINEZ, H.P.; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M. Avaliação do estado nutricional do cafeeiro após a fertirrigação com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa-MG, v.15, n.4, p.392-399, 2007.
- LUIZ, F.A.R. *Desempenho de reatores anaeróbios de leito fixo no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro*. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2007.
- MASBOUGH, A.; FRANKOWSKI, K.; HALL, K.J.; DUFF, S.J.B. The effectiveness of constructed wetland for treatment of woodwaste leachate. *Ecological Engineering*, Oxford, v.25, p.552-566, 2005.
- 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 e Água*, Taubaté, v.3, n.1, p.43-53, 2008.
- MATOS, A.T.; MAGALHÃES, M.A.; FUKUNAGA, D.C. Remoção de sólidos em suspensão na água residuária da despolpa de frutos do cafeeiro em filtros constituídos por pergaminho de grãos de café submetido a compressões. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.2, p.610-616, 2006.
- MATOS, A.T.; PINTO, A.B.; PEREIRA, O.G.; BARROS, F.M. Extração de nutrientes por forrageiras cultivadas com águas residuárias do beneficiamento de frutos do cafeeiro. *Revista Ceres*, Viçosa-MG, v.52, n.303, p.675-688, 2005.
- METCALF, EDDY, Inc. *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1.819 p.
- PRADO, M.A.C.; CAMPOS, C.M.M. Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos do processamento de *Coffea arabica* L. em reator anaeróbio UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras-MG, v.32, n.3, p.938-947, 2008.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal of Water Pollution Control Federation*, Alexandria, v.58, p.406-411, 1986.

SOHSALAM, P.; SIRIANUNTAPIBOON, S. Feasibility of using constructed wetland treatment for molasses wastewater treatment. *Bioresource Technology*, Essex, v.99, n.13, p.5.610-5.616, 2008.

TAO, W.; HALL, K.J.; DUFF, S.J.B. Performance evaluation and effects of hydraulic retention time and mass loading rate on treatment of woodwaste leachate in surface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, Oxford, v.26, p.252-265, 2006.

USEPA. Environmental Protection Agency. *Wastewater technology fact sheet wetlands: subsurface flow*. EPA 832-F-00-023. Washington, 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/design.pdf>>. Acesso em: 9 out. 2003.