

II-432 – BIOCONVERSÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA E DO MELAÇO EM REATORES UASB INOCULADO COM LODO GRANULADO

Valciney Gomes de Barros⁽¹⁾

Tecnólogo em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia “Nilo de Stéfani” de Jaboticabal (FATEC-Jaboticabal). Mestre em Microbiologia Agropecuária pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Jaboticabal. Doutorando em Microbiologia Agropecuária pela UNESP, Campus de Jaboticabal.

Rose Maria Duda⁽²⁾

Engenheira Química; Mestre e Doutora em Microbiologia Agropecuária pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Jaboticabal; Pós-doutoranda do Departamento de Eng. Rural da UNESP, Campus de Jaboticabal, Professora Assistente, da Faculdade de Tecnologia “Nilo de Stéfani” de Jaboticabal (FATEC-Jaboticabal).

Roberto Alves de Oliveira⁽³⁾

Engenheiro Agrônomo e Tecnólogo em Construção Civil; Mestre em Agronomia – Produção Vegetal pela UNESP, Câmpus de Jaboticabal; Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP); Professor Assistente Doutor, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Jaboticabal.

Endereço^{(1), (2) e (3)}: Departamento de Engenharia Rural - Via de acesso Prof. Paulo Donato Castellane - s/n - Jaboticabal/SP - Cep. 14884-900 – Brasil - Tel: (16) 3209-2638 - e-mail: oliveira@fcav.unesp.br; roseduda@zipmail.com.br;

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se a conversão anaeróbia da vinhaça e melaço em metano, com aumento gradual da carga orgânica volumétrica (COV), em dois reatores UASB (R1 e R2) com volumes de 40,5 e 21,5 L, na faixa de temperatura mesofílica. Os reatores UASB foram operados durante 350 dias, utilizando a vinhaça de bioetanol de cana-de-açúcar e melaço de cana-de-açúcar, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 2,8 e 1,8 d e COV de 0,2 a 11,5 g DQOtotal (L d)⁻¹ no R1 e R2, respectivamente. Os valores médios das eficiências de remoção de DQOtotal variaram de 49 a 82%. As melhores porcentagens da DQO removida convertida em metano foram de 48 a 58% no R1 e de 39 a 65 % no R2. A recirculação do efluente permitiu a manutenção do pH do afluente do R1 e do R2 na faixa de 6,5 a 6,8, mas provocou a diminuição das conversões de DQO em metano no R2, de 53% para 42%. O metano produzido durante o tratamento anaeróbio pode ser utilizado como fonte de energia para o processo industrial e contribui para que a utilização da vinhaça ocorra de forma sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Carga orgânica volumétrica, Tratamento anaeróbio mesofílico, Vinhaça.

INTRODUÇÃO

A necessidade de promover a sustentabilidade nas indústrias sucroenergéticas do Brasil tem contribuído para a intensificação das pesquisas para o aproveitamento da vinhaça, resíduo final da fabricação do bioetanol por via fermentativa. Estima-se que para cada litro de bioetanol de cana-de-açúcar são produzidos aproximadamente 10 a 15 litros de vinhaça (Souza *et al.*, 1992; Ferreira *et al.*, 2011; Moraes *et al.*, 2014; Wilkie *et al.*, 2000). Em virtude das grandes quantidades de vinhaça produzida, algumas alternativas estão sendo desenvolvidas para tratamento e utilização da vinhaça, tais como o aproveitamento na fermentação, fertirrigação, concentração por evaporação e na produção de energia através do processo de digestão anaeróbia (Christofollet *et al.*, 2013).

No Brasil é comum a prática de aplicação da vinhaça *in natura* na agricultura como fertilizante, através do processo chamado de fertirrigação. Segundo Ribas (2007) esta prática deve ser utilizada quando a matéria orgânica estiver estabilizada. De acordo com Moraes *et al.* (2014) ainda existem dúvidas se a prática da fertirrigação da vinhaça *in natura* não resultará em impactos ambientais, embora seja permitido por lei.

O principal objetivo da digestão anaeróbia no tratamento anaeróbio de águas residuais é normalmente a conversão eficiente de material orgânico da água residuária em metano. Alternativamente, a digestão anaeróbia

pode ser aplicada para o tratamento da vinhaça, devido à redução da matéria orgânica e a produção de biometano, mantendo a maioria dos seus nutrientes, tais como potássio, nitrogênio e fósforo. A digestão anaeróbia da vinhaça é considerada como uma alternativa interessante, pois o biometano produzido pode ser utilizado como fonte de energia para os diversos processos nas usinas (Kaparaju *et al.*, 2010). Segundo Van Haandel (2013) a produção de energia que pode ser gerada a partir da vinhaça é suficiente para atender a demanda de energia da destilaria. Dentro dos cenários considerados, os ganhos de energia, que atualmente são desperdiçados no solo, não podem ser ignorados e o potencial de produção de metano e, consequentemente, de produção de eletricidade da vinhaça é considerável.

A sazonalidade do funcionamento de sistemas anaeróbios na indústria de etanol está diretamente ligada à geração de resíduos orgânicos passíveis de tratamento, como a vinhaça. Para o funcionamento dos sistemas anaeróbios durante o período de entressafra, o melaço, subproduto do processo de refino do açúcar, em virtude do seu baixo custo e disponibilidade, pode ser utilizado como substrato alternativo para a produção de metano, com potencial para melhorar o balanço energético nas usinas. Park *et al.* (2010) avaliaram dois reatores anaeróbios para a produção de hidrogênio e metano, com o melaço de cana-de-açúcar como fonte de carbono, e verificaram que foi possível gerar $13,2 \text{ MJ (L)}^{-1}$ de melaço, enquanto na produção de álcool são gerados $9,0 \text{ MJ (L)}^{-1}$ de melaço.

Portanto, neste trabalho avaliou-se a conversão anaeróbia da vinhaça e melaço de cana-de-açúcar em metano, em reatores UASB, para a produção de biometano.

MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade experimental foi constituída por dois reatores UASB (R1 e R2), com volumes de 40,5 L (R1) e 21,5 L (R2) (Figura 1).

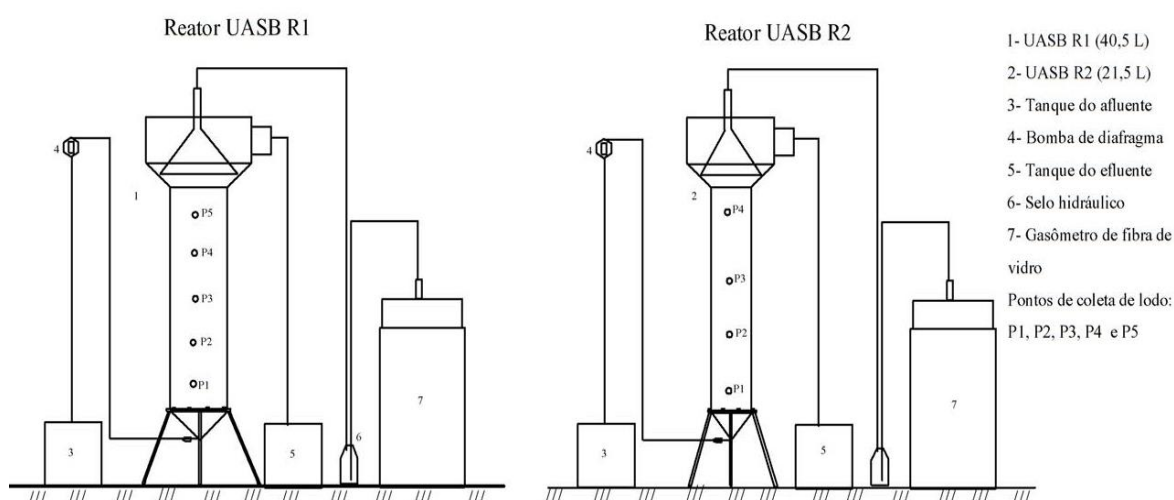


Figura 1. Representação esquemática do sistema de tratamento com os reatores anaeróbios UASB, R1 e R2.

Os reatores foram operados durante 350 dias, e o afluente utilizado foi a vinhaça *in natura* e o melaço de cana-de-açúcar. A vinhaça foi utilizada por 230 dias durante a safra da cana-de-açúcar de 2012 (safra 1), e por 42 dias no início da safra seguinte em 2013 (safra 2). O melaço de cana-de-açúcar foi utilizado por 78 dias (período de entressafra) para manter os reatores em funcionamento. Na tabela 1 estão apresentados os exames e determinações, as frequências e fonte das metodologias utilizadas.

Tabela 1. Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas.

EXAMES E DETERMINAÇÕES	FREQUÊNCIA	REFERÊNCIAS
Afluentes e efluentes		
pH	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método: 4500 H+B)
Demanda química de oxigênio (DQO _{total})	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método: 5220 – B); Oliveira (1997).
Alcalinidade total (AT)	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (2005); Dilallo e Albertson (1961)
Ácidos voláteis totais (AVT)	Duas vezes \ semana	Dilallo e Albertson (1961)
Lodo		
Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)	Quinzenalmente	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método 2540 – B e 2540 – E)
Biogás		
Produção	Diariamente	(Método: Gasômetros) - Oliveira (1997)
Composição	Semanal	APHA; AWWA; WPCF (2005) (Método: cromatografia gasosa)

Para a partida dos reatores R1 e R2 foi utilizado como inóculo, o lodo granular de reatores UASB utilizados para o tratamento de águas residuárias de suinocultura, com valores de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) de 45,6 g L⁻¹ e 30,4 g L⁻¹, respectivamente. O volume do lodo utilizado foi suficiente para preencher 30% do volume de cada um dos reatores.

O aumento gradual da COV foi realizado para a adaptação do lodo de inóculo e para a verificação das condições de estabilidade com COV maiores. As COV aplicadas no período de safra 1 foram de 0,2 a 7,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R1 e de 0,2 a 11,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R2. Com a utilização do melaço na entressafra diminuiu-se a COV de 7,5 para 5,0 g DQO_{total} (L d)⁻¹ do R1 e de 11,5 para 5,0 g DQO_{total} (L d)⁻¹ do R2. Com a retomada da vinhaça no período de safra 2 aumentou-se a COV de 5,0 para 11,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ e de 5,0 para 7,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R2 (Figura 2).

Os valores médios de pH do afluente do R1 e R2 nos primeiros 158 e 172 dias de operação, respectivamente, foram corrigidos com uma solução de NaOH (10 M) para valores de 6,5 a 7,0. Após este período foi efetuada a recirculação do efluente para o aproveitamento da alcalinidade gerada nos reatores para correção do pH da vinhaça e foi eliminada a utilização de NaOH.

Foram utilizados dois reatores UASB (R1 e R2), operados separadamente, para avaliar a aplicação de COV de até 7,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R1 e de até 11,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R2, na safra 2. As COV foram calculadas dividindo-se a demanda química de oxigênio (DQO_{total}) do afluente pelo tempo de detenção hidráulica do reator (TDH).

No R1 as COV aplicadas foram crescentes de 0,2 a 2,5; 2,5 a 5,0; 5,0 a 7,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹, durante a safra 1 (230 dias). Após este período, com a utilização do melaço na entressafra, foi necessário diminuir a COV de 7,5 para 5,0 g DQO_{total} (L d)⁻¹, e posteriormente, aumentou-se a COV de 5,0 para 11,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ com a retomada da vinhaça, após 308 dias de operação.

No R2 também as COV aplicadas foram crescentes, buscando-se atingir valores finais mais elevados, de 0,2 a 11,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ na safra 1. Após este período foi necessário diminuir a COV de 11,5 para 5,0 g DQO_{total} (L d)⁻¹ com a utilização do melaço na entressafra e, posteriormente, aumentou-se a COV de 5,0 para 7,5 g DQO_{total} (L d)⁻¹ com a retomada da vinhaça, após 308 dias de operação.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) aplicado nos reatores foi de 2,8 dias no R1 e R2. No R2 após 220 dias o decréscimo no TDH para 1,8 d, foi necessário para obter o aumento gradual da COV, mantendo-se a quantidade de vinhaça e acrescentando maior volume do efluente recirculado, e manutenção da alcalinidade.

As demandas químicas de oxigênio total (DQO_{total}), nitrogênio Kjeldahl (NK) e fósforo total (P-total) encontradas na vinhaça in natura foram de 45.000, 470 e 62 mg L⁻¹, respectivamente. Portanto não atenderam a quantidade mínima recomendada de DQO : N : P = 350 : 5 : 1 para o adequado desenvolvimento microbiano, conforme recomendado por Souza et al. (1992) para o tratamento anaeróbio da vinhaça.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fatores ambientais: pH , alcalinidade e ácidos voláteis.

Os fatores ambientais pH, alcalinidade total (AT) e ácidos voláteis totais (AVT) estão intimamente relacionados, sendo igualmente importantes para o controle e a operação adequada dos processos anaeróbios. Os valores médios de pH do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2, variaram de 6,5 a 7,0 e de 7,4 a 7,9, respectivamente (Tabelas 2 e 3). Portanto, os valores médios de pH do afluente e do efluente dos reatores UASB estiveram na faixa de valores considerada ótima para o desenvolvimento da microbiota metanogênica, de 6,7 a 7,8 (Van Haandel, 1994).

Tabela 2. Valores médios e coeficientes de variação (c.v. em %) do pH, ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade total (AT), do afluente e efluentes do R1, obtidos durante o tratamento da vinhaça no período de safra 1 e início da safra de 2 e do melaço no período de entressafra.

REATOR UASB R1		VINHAÇA (safra1)				MELAÇO (entressafra)	VINHAÇA (safra 2)
COV (g DQO _{total} (L d) ⁻¹)		0,2 a 2,5	2,5 a 5,0	5,0 a 7,5	7,5	7,5 a 5,0	5,0 a 11
pH	Afluente	6,94	6,51	6,80	6,80	7,09	6,61
	c.v.	2,7	0,3	4,4	2,8	5	3
	Efluente	7,41	7,88	7,89	7,82	7,35	7,59
	c.v.	4,5	2,8	1,8	7,8	7	3
AT (mg L ⁻¹ de CaCO ₃)	Afluente	216	781	2349	4828	3897	3630
	c.v.	38	31	46	17	39	81
	Efluente	532	2529	4280	6100	4488	5637
	c.v.	64	20	20	29	43	23
AVT (mg L ⁻¹ de CH ₃ COOH)	Afluente	158	943	1599	3050	2991	3237
	c.v.	77	44	37	6	37	30
	Efluente	60	388	623	1728	2733	3302
	c.v.	48	67	23	23	45	42
AVT/AT	Efluente	0,13	0,15	0,14	0,31	1,06	0,75
	c.v.	34	47	13	8	65	40

As concentrações de AVT no efluente do R1 e do R2 nos primeiros 230 dias de operação foram crescentes, com os valores médios de 60 a 1728 mg L⁻¹ no R1 e de 61 a 2922 mg L⁻¹ no R2. Contudo, esses valores foram muito inferiores aos dos afluentes, os quais variaram de 158 a 4663 mg L⁻¹. Portanto, nesse período as condições predominantes favoreceram o consumo de AVT. Os aumentos da COV, para os valores mais elevados, prejudicaram esse processo e provocaram o acúmulo de AVT, prejudicando as condições de estabilidade dos reatores UASB, principalmente do R2, onde foram aplicadas as maiores COV (Tabelas 2 e 3). A acumulação do AVT no tratamento da vinhaça foi mencionada por Souza et al. (1992) e Espinosa *et al.* (1995) e o acúmulo dos AVT pode ser resposta típica do reator para mudanças rápidas de COV que podem promover a enorme queda no pH e, conseqüentemente, o fracasso do processo (Leitão et al., 2006).

Tabela 3. Valores médios e coeficientes de variação (c.v. em %) do pH, ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade total (AT), do afluente e efluentes do R2, obtidos durante o tratamento da vinhaça no período de safra 1 e início da safra de 2 e do melaço no período de entressafra.

REATOR UASB R2		VINHAÇA (safra1)				MELAÇO (entressafra)	VINHAÇA (safra 2)
COV (g DQOtotal (L d) ⁻¹)		0,2 a 2,5	2,5 a 5,0	5,0 a 11,5	11,5	7,5 a 5,0	5,0 a 7,0
pH	Afluente	6,94	6,51	6,55	6,39	6,96	6,50
	c.v.	2,7	0,3	3	6	5	1
	Efluente	7,52	7,88	7,95	7,71	7,30	7,38
	c.v.	4,5	2,4	1	3	7	3
AT (mg L ⁻¹ de CaCO ₃)	Afluente	216	781	1525	4387	4200	3629
	c.v.	38	31	63	28	34	23
	Efluente	558	2517	3715	6289	4756	4869
	c.v.	57	34	18	20	29	26
AVT (mg L ⁻¹ de CH ₃ COOH)	Afluente	158	943	1878	4663	3782	3421
	c.v.	78	44	41	10	36	31
	Efluente	61	328	478	2922	3570	3728
	c.v.	43	56	16	47	40	27
AVT/AT	Efluente	0,12	0,13	0,13	0,5	0,78	0,78
	c.v.	36	39	19	58	36	14

Após 230 dias de operação com a utilização do melaço no período da entressafra os valores de AVT no efluente do R1 e R2 aumentaram e foram de 2773 e 3570 mg L⁻¹, respectivamente, aproximando-se dos valores do afluente. Com a utilização da vinhaça, na safra 2, esse comportamento intensificou-se e os valores médios de AVT dos efluentes do R1 e R2 aumentaram e superaram os dos afluentes, indicando a ocorrência de condições desfavoráveis para a conversão dos AVT à metano (Tabelas 2 e 3). Contudo, não houve falência dos reatores UASB, com acidificações, em virtude dos acréscimos na AT, que foram suficientes para manter os valores do pH dos efluentes acima de 7,0.

Demanda Química de oxigênio vinhaça e do melaço

Aproximadamente 75% de sólidos em suspensão presentes na vinhaça são orgânicos e biodegradáveis (Khemkhao *et al.*, 2012), que proporciona uma alta demanda química de oxigênio (DQO) e bioquímica (DBO) (Kaparaju *et al.*, 2010; Laime *et al.*, 2011). Os valores médios da demanda química de oxigênio total (DQOtotal) do afluente, com a diluição da vinhaça no efluente, foram crescentes de 1866 até 21971 mg L⁻¹ no R1 e de 1866 até 28543 mg L⁻¹ no R2, proporcionando o aumento gradual das COV aplicadas, durante o período de safra 1. Com o início da safra 2, utilizou-se novamente a vinhaça nos reatores R1 e R2. Os valores médios de DQOtotal do afluente foram de 26222 mg L⁻¹ no R1 e de 18154 no R2 (Figura 2).

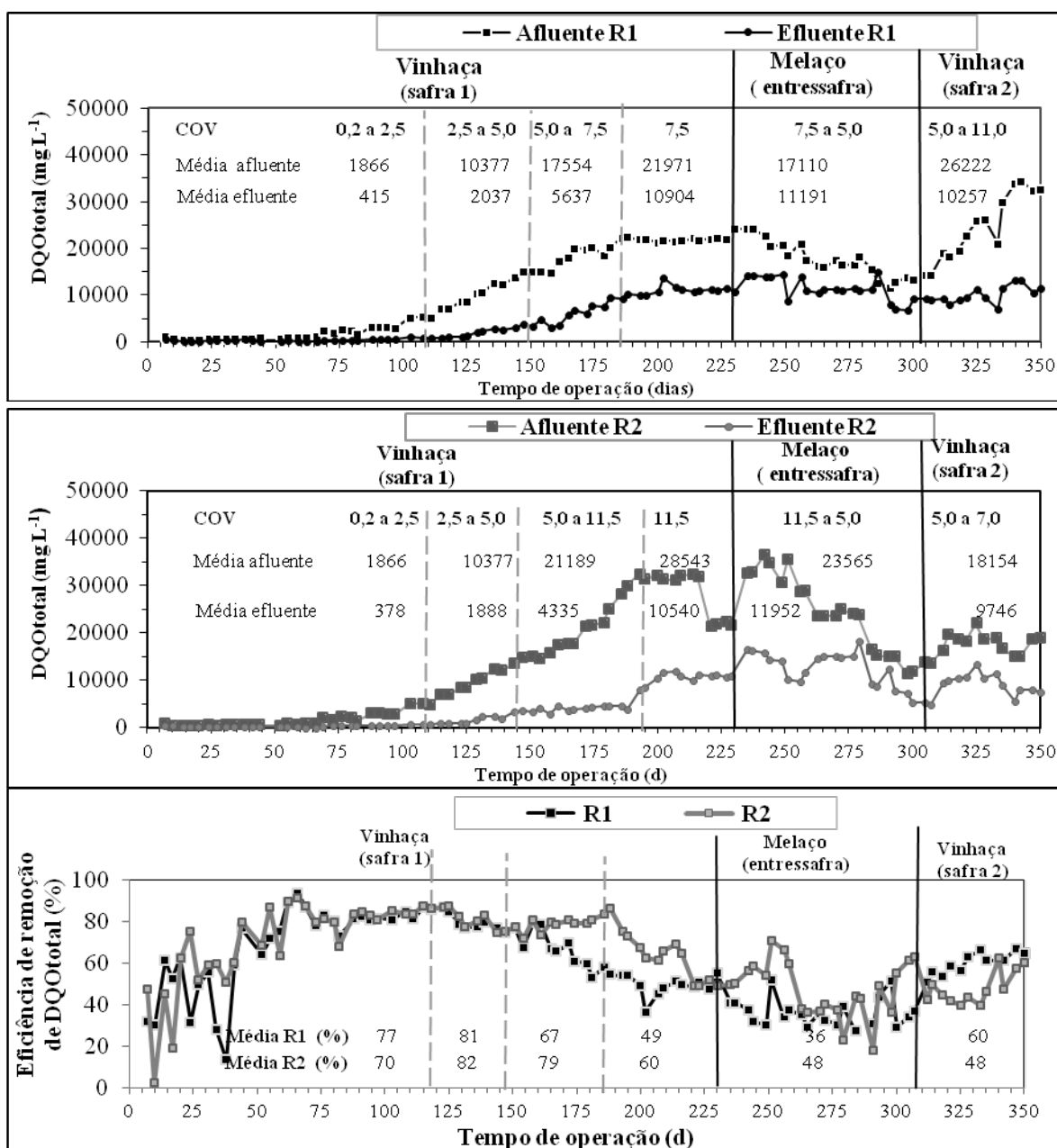


Figura 2. Valores de DQOtotal, nos afluentes e efluentes, e eficiência de remoção de DQOtotal do reatores UASB (R1 e R2) no tratamento da vinhaça, durante a safra 1 e início da safra 2, e do melão no período de entressafra.

As maiores eficiências de remoção da DQOtotal do afluente foram de 81% e 82% no R1 e R2, respectivamente, no período da safra 1. Os valores de eficiências de remoção de DQOtotal nos reatores R1 e R2 foram acima de 75% com a aplicação de COV de 1,0 a 7,0 g DQOtotal (L d)⁻¹ na safra 1. España-Gamboa *et al.* (2012) aplicaram COV de 7,27 a 22,16 g DQOtotal (L d)⁻¹ em reator UASB no tratamento da vinhaça em condições de temperatura mesofílicas, e obtiveram eficiências de remoção de DQO de 55 a 73%.

As menores eficiências de remoção de DQOtotal ocorreram com a utilização do melão no período de entressafra, de 36% e 42% no R1 e R2, respectivamente. Isso pode ter ocorrido em virtude do acúmulo de compostos remanescentes de difícil degradação com a sucessiva reutilização dos efluentes para diluição do melão.

Produção de biometano da vinhaça e do melaço

A produção volumétrica de metano foi crescente com o aumento da COV, e os maiores valores de produção volumétrica de metano ocorreram na safra 1, atingindo valores de $1,3 \text{ L CH}_4 (\text{L d})^{-1}$ no R1 e de $0,9 \text{ L CH}_4 (\text{L d})^{-1}$ no R2 (Figura 3). Com a utilização do melaço no período de entressafra foram obtidos os menores valores de produção volumétrica de metano, próximos a $0,3 \text{ L CH}_4 (\text{L d})^{-1}$ nos reatores R1 e R2, e pode ter ocorrido em virtude dos altos valores de AVT, de aproximadamente 6000 mg L^{-1} . Para evitar o colapso dos reatores, as COV foram reduzidas para valores próximos a $5,5 \text{ g DQO total } (\text{L d})^{-1}$, mas as produções volumétricas de metano continuaram abaixo de $0,3 \text{ L CH}_4 (\text{L d})^{-1}$, e aumentaram no R1 após a retomada com vinhaça na safra 2.

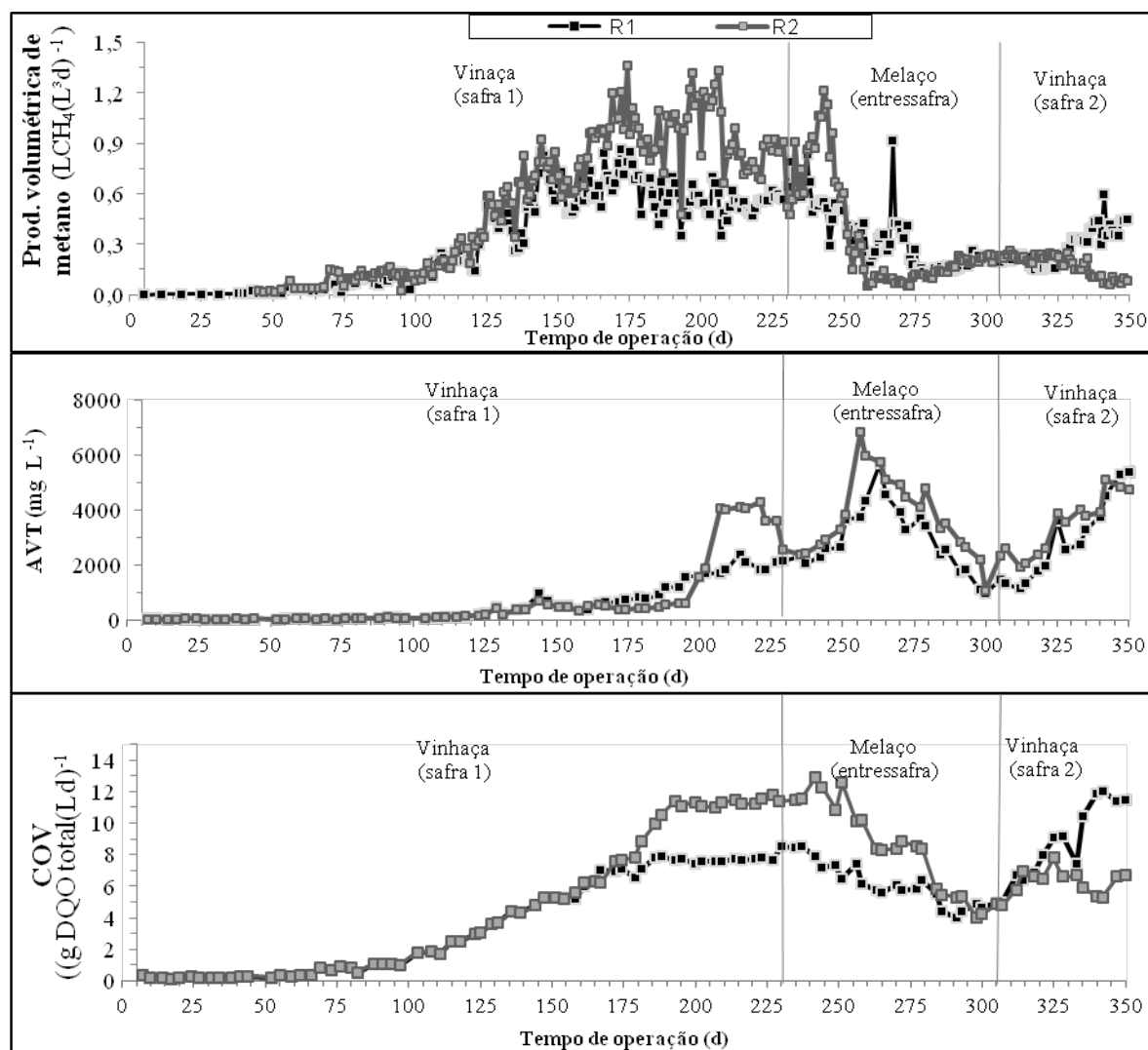


Figura 3. Produção volumétrica de metano e concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) do efluente com o aumento gradual da COV (carga orgânica volumétrica) durante a operação dos reatores UASB (R1 e R2) utilizando como afluente a vinhaça durante a safra 1 e início da safra 2, e o melaço de cana-de-açúcar no período de entressafra.

A produção específica de metano foi crescente de $0,133$ a $0,190 \text{ L CH}_4 (\text{g DQO total removida})^{-1}$, e de $0,145$ a $0,179 \text{ L CH}_4 (\text{g DQO total removida})^{-1}$, no R1 e R2, com a aplicação de COV de até $7,5$ e $5,0 \text{ g DQO total } (\text{L d})^{-1}$, respectivamente (Tabela 3). Com a utilização do melaço a produção específica de metano diminuiu para valores médios de $0,157$ e $0,081 \text{ L CH}_4 (\text{g DQO total removida})^{-1}$, no R1 e R2, respectivamente. Com a retomada com a vinhaça, na safra 2, os valores continuaram a diminuir até $0,081$ e $0,054 \text{ L CH}_4 (\text{g DQO total removida})^{-1}$, no R1 e R2, respectivamente, como consequência dos elevados valores de AVT.

Tabela 3. Valores médios e coeficientes de variação (c.v. em %), da concentração de metano no biogás e das produções volumétrica e específica de metano e DQOtotal removida convertida em metano, durante a operação dos reatores UASB (R1 e R2) utilizando como afluente a vinhaça durante a safra 1 e início da safra 2, e o melaço de cana-de-açúcar no período de entressafra.

Reator UASB	COV (g DQOtotal (L d) ⁻¹)	CH ₄ no biogás		Produção volumétrica (L CH ₄ (L d) ⁻¹)		Produção específica CH ₄ (L CH ₄ (g DQO removida) ⁻¹)		DQOtotal removida convertida em CH ₄ (%)	
			(%)						
			C.V.		C.V.		C.V.		
R1	Vinhaça	0,2 a 2,5	84	8	0,087	80	0,133	48	57,8
		2,5 a 5,0	68	5	0,440	43	0,175	30	50,9
		5,0 a 7,5	62	8	0,597	18	0,181	20	48,4
		7,5	70	6	0,624	19	0,190	21	54,4
	Melaço	7,5 a 5,0	52	24	0,322	70	0,157	59	53,1
	Vinhaça	5,0 a 11	47	13	0,325	19	0,081	48	19,7
R2	Vinhaça	0,2 a 2,5	85	6	0,120	57	0,145	33	64,5
		2,5 a 5,0	69	3	0,550	34	0,179	22	51,7
		5,0 a 11,5	66	4	0,902	30	0,164	25	53,0
		11,5	61	12	0,938	22	0,115	30	41,6
	Melaço	11,5 a 5,0	39	36	0,326	38	0,081	30	22,4
	Vinhaça	5,0 a 7,0	38	19	0,163	29	0,054	38	15,5

COV- carga orgânica volumétrica

A produção específica de metano obtidas, ficaram abaixo do valor teórico, obtido estequiometricamente, de 0,35 L CH₄ (g DQOtotal removida)⁻¹ nas CNTP. Kaparaju *et al.* (2010) obtiveram valor máximo de 0,155 L CH₄ (g DQOtotal removida)⁻¹ com COV de 17,1 g DQOtotal (L d)⁻¹, em reator UASB em condições termofílicas, indicando que o valor máximo alcançado, no R1 de 0,19 CH₄ (g DQOtotal removida)⁻¹ com COV de 7,5 g DQOtotal (L d)⁻¹ pode ser considerado relevante para o projeto de reatores UASB para o tratamento da vinhaça e produção de metano em condições mesofílicas. Contudo, ainda é possível otimizar esse valor, melhorando o separador trifásico do reator UASB, pois mesmo em condições mesofílicas, pois España-gamboa *et al.* (2012) L CH₄ (g DQOtotal removida)⁻¹ com COV de 17,05 g DQOtotal (L d)⁻¹. Embora deve-se destacar que o R1 foi mantido com produções específicas de 0,175 a 0,190 L CH₄ (g DQOtotal removida)⁻¹ por 114 dias, enquanto España-Gamboa *et al.* (2012) alcançaram e mantiveram pelo período de poucos dias. E ainda, em condições termofílicas, Souza *et al.* (1992) obtiveram produção específica de 0,37 L CH₄ (g DQOtotal removida)⁻¹, com COV de 26,5 g DQOtotal (L d)⁻¹ em reatores UASB.

Sólidos totais e voláteis no lodo dos reatores UASB, R1 e R2.

As concentrações de sólidos totais (ST) no lodo dos reatores UASB (R1 e R2) tratando vinhaça, aumentaram com a COV, no período de até 230 dias (Figuras 4 e 5), indicando que houve crescimento na manta de lodo dos reatores. No R1, os ST aumentaram de 48,2 para 74,1 g L⁻¹, de 40,5 para 72,1 g L⁻¹, de 31,2 para 54,6 g L⁻¹, de 4,9 para 25,6 g L⁻¹ e de 4,6 para 29,9 g L⁻¹, nos pontos de coleta de lodo P1, P2, P3, P4 e P5, respectivamente, com o aumento das COV aplicadas, de 0,2 a 7,5 g DQOtotal (L d)⁻¹ (Figura 4 e 5).

No R2, no período de até 230 dias os ST aumentaram de aproximadamente, 45,0 para 69,0 g L⁻¹, de 42,5 para 67,0 g L⁻¹, de 30,6 para 30,8 g L⁻¹ e de 4,0 para 27,2 g L⁻¹, nos pontos de coleta de lodo P1, P2, P3 P4, respectivamente, com o aumento das COV aplicadas, de 0,2 a 11,5 g DQOtotal (L d)⁻¹. O decréscimo nos valores de ST, nos pontos de coleta P4 e P3, do R1 e R2, respectivamente, para as COV aplicadas de 5,0 a 7,5 g DQOtotal (L d)⁻¹, ocorreram em virtude do descarte de 10% do volume da manta de lodo dos reatores, para evitar o arraste de SSV com o efluente. No período de 230 a 350 dias de operação com a utilização do melaço

e posteriormente com a retomada do tratamento da vinhaça, as concentrações de ST no lodo diminuíram nos reatores UASB, R1 e R2, indicando que houve redução na manta de lodo dos reatores.

A relação SV/ST do lodo do R1 variou de 0,67 a 0,75 no P1, de 0,58 a 0,81 no P2, de 0,63 a 0,78 no P3, de 0,58 a 0,68 no P4 e de 0,53 a 0,60 no P5. No R2 a relação SV/ST variou de 0,65 a 0,80 no P1, de 0,56 a 0,76 no P2, de 0,58 a 0,69 no P3, de 0,55 a 0,68 no P4. As altas relações SV/ST evidenciam a predominância de matéria orgânica no lodo, e consequentemente a presença de microrganismos, considerando-se as altas conversões de DQO à metano observadas no R1 e R2. (OLIVEIRA, 1997).

Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 357, de 2006, para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70. Assim, observou-se que o lodo foi estabilizado, principalmente nos pontos de coleta superiores, P4 e P5 do R1 e no P3 e P4 do R2. Portanto, o descarte de lodo, quando houver necessidade, deverá ser realizado a partir do P3, no R1 e do P4 no R2, que possui a relação SV/ST inferior a 0,7 e está estável para disposição final.

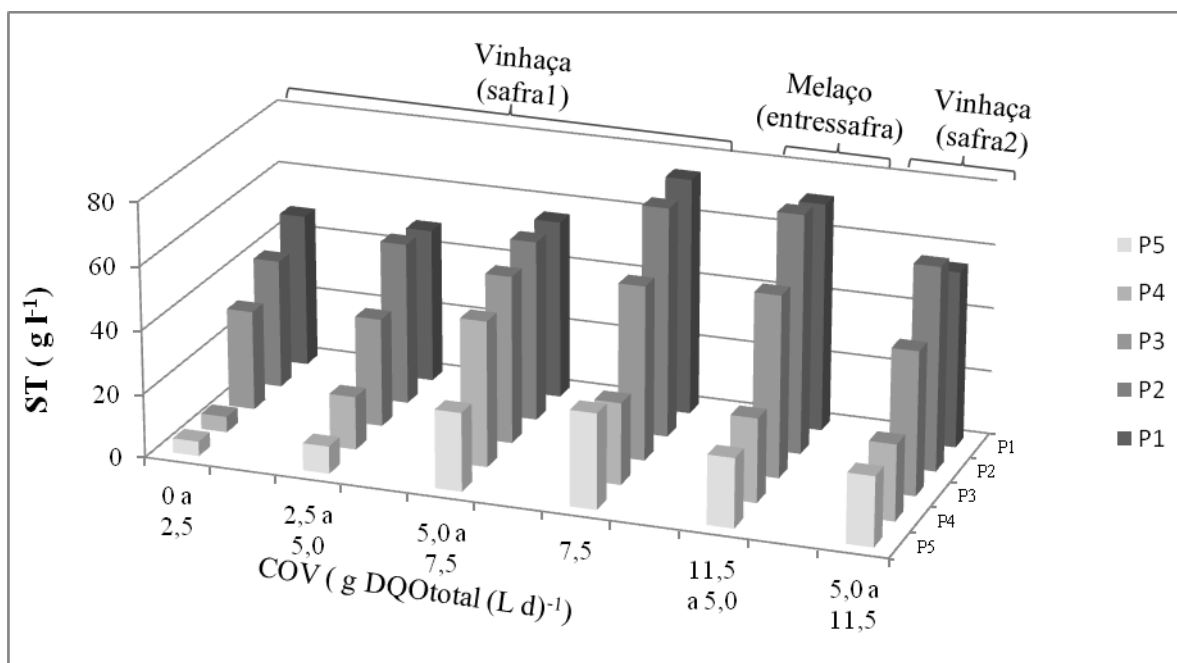


Figura 4. Concentrações de Sólidos Totais (ST) nos pontos de coletas do reator UASB R1 (apresentados na Figura 1), no tratamento da vinhaça, com aumento gradual da carga orgânica volumétrica (COV), durante a safra 1 e início da safra 2, e do melaço no período de entressafra.

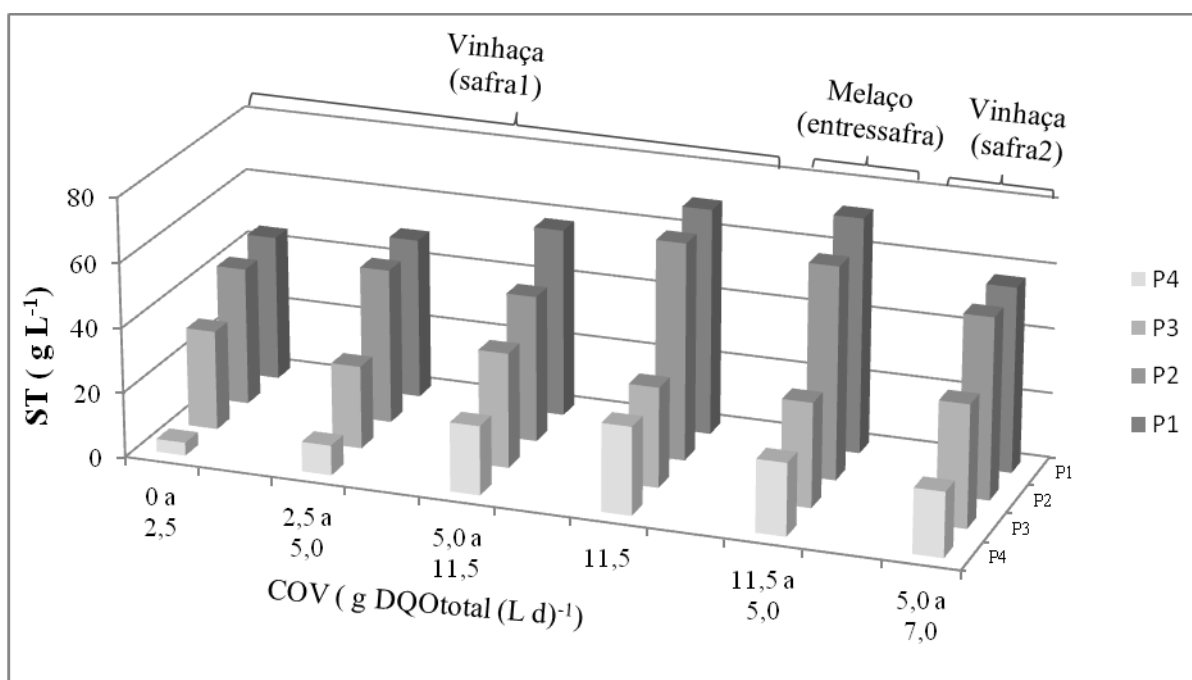


Figura 5. Concentrações de Sólidos Totais (ST) nos pontos de coletas do reator UASB R2 (apresentados na Figura 1), no tratamento da vinhaça, com aumento gradual da carga orgânica volumétrica (COV), durante a safra 1 e início da safra 2, e do melaço no período de entressafra.

CONCLUSÕES

A maior conversão de DQOtotal da vinhaça em metano foi de $0,190 \text{ L CH}_4 (\text{g DQOtotal removida})^{-1}$, para valores médios de COV de $7,5 \text{ g DQOtotal (L d)}^{-1}$, no R1. O melaço de cana de açúcar diluído com o efluente foi uma opção para a manutenção dos reatores UASB em funcionamento na entressafra, com COV de até $11,5 \text{ g DQOtotal (L d)}^{-1}$, enquanto os ácidos voláteis totais estiveram abaixo de 3000 mg L^{-1} .

A utilização dos efluentes para a diluição da vinhaça e do melaço permitiu corrigir o pH do afluente, sem a necessidade de adição de hidróxido de sódio, com COV de até $11,5 \text{ g DQOtotal (L d)}^{-1}$.

A conversão anaeróbia da vinhaça e do melaço em reatores UASB resulta na produção de metano, de lodo estabilizado e de efluente de melhor qualidade. O metano pode ser utilizado como fonte de energia nos processos industriais e os nutrientes da vinhaça, do melaço e os adicionados para suplementar o tratamento anaeróbio podem ser reciclados através do uso do efluente na fertirrigação e do lodo na adubação.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA. WPCF, Standard methods for the examination of water and wastewater, v. 21, 2005
2. Brasil. Ministério do Meio Ambiente CONAMA 2005. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de águas e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005.
3. Dilallo R., Albertson O. E. Volatile acids by direct titration. *J. Water Poll. Control Fed.*, **33**, 356-365, 1961

4. España-Gamboa E. I., Mijangos-Cortés J. O., Hernández-Zárate O., Maldonado J. A. D., Alzate-Gaviria L. M. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. *Biotechnology for Biofuels*, **5**, 2-9, 2012.
5. Espinosa A., Rosas L., Ilangovan K., Noyola A. Effect of trace metals on the anaerobic degradation of volatile fatty acids in molasses stillage. *Wat. Sci. Tech.*, **32**, 121-129, 1995.
6. Ferreira L. F., Aguiar M. M., Messias T., Pompeu G.B., Lopez Q. M. Q., Silva D.P., Monteiro R. T. Evaluation of sugar-cane vinasse treated with *Pleurotussajor-caju* utilizing aquatic organisms as toxicological indicators, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **74**, 132-137, 2011.
7. Kaparaju P., Serrano M., Angelidaki I. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor. *Applied Energy*, **87**, 3779-3783, 2010.
8. Khemkhao M., Nuntakumjorn B., Techkarnjanararuk S., Phalakornkule C. UASB performance and microbial adaptation during a transition from mesophilic to thermophilic treatment of palm oil mill effluent, *Journal of Environmental Management*, **103**, 74 -82, 2012.
9. Laime E. M. O., Fernandes P. D., Souza D. C., Freire E. A. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão, *Revista Trópica*, **5**, 16-29, 2011.
10. Leitão R. C., Van Haandel A. C., Zeeman G., Lettinga G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. *Bioresour. Technol.*, **97**, 1105-1118, 2006.
11. Park, M. J.; Lo, J. H.; Park, D.; Lee, D. S.; Park, J. M. Comprehensive study on a two-stage anaerobic digestion process for the sequential production of hydrogen and methane from cost-effective molasses. *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 6194- 6202, 2010.
12. Moraes B. S., Junqueira T. L., Pavanetto L. G., Cavalett O., Mantelatto P. E., Bonomi, A., Zaiat M. anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?. *Applied Energy*, **113**, 825-835, 2014.
13. Oliveira R. A. Efeito da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil. 1997.
14. Parnaudau V., Condom N., Oliver R., Cazevieuille P., Recous S. Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. *Bioresour. Technol.*, **99**, 1553-1562, 2008.
15. Ribas M. M., Foresti E. Efeito do bicarbonato de sódio no tratamento de vinhaça em AnSBBR operado a 55 e 35°C. *Engenharia Sanitária Ambiental*, **15**, 275-282., 2010.
16. Ripley L. E., Boyle W. C., Converse J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *J. Water Poll. Control Fed*, **58**, 406-411, 1986.
17. Souza M. E., Fuzaro G., Polegato A. R. 1992 Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. *Wat. Sci. Tech.*, **25**, 213-222, 1992.
18. Van Haandel A. C. Influence of the digested COD concentration on the alkalinity requirement in anaerobic digesters. *Wat. Sci. Tech.*, **30**, 23-24, 1994.
19. Van Haandel A. C., De Vrieze J., Verstraete W., Santos V. S. Methanosaeta dominate acetoclastic methanogenesis during high-rate methane production in anaerobic reactors treating distillery wastewaters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, doi: 10.1002/jctb.4255, 2013.
20. UNICA- União da indústria de cana-de-açúcar. Novas tecnologias trazem mais sustentabilidade para a vinhaça. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia /27455300920320868796/novas-tecnologias-trazem-mais-sustentabilidade-para-a-vinhaca/>> (acesso em 10.09.2014), 2014.
21. Wilkie A. C., Riedesel K. J., Owens J. M. 2000 Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, **19**, 63-102, 2000.