

Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reator anaeróbio operado em batelada sequencial

Treatment of swine wastewater in anaerobic sequencing batch reactor

Roberto Alves de Oliveira

Engenheiro Agrônomo e Tecnólogo em Construção Civil pela Universidade Estadual Paulista (Unesp); Doutor em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP); Professor assistente do Departamento de Engenharia Rural da Unesp

Rose Maria Duda

Engenheira Química pela Universidade Federal do Paraná (UFPR); Mestre em Microbiologia Agropecuária pela Unesp; Doutoranda em Microbiologia Agropecuária pela Unesp

Resumo

Neste estudo avaliou-se o desempenho de um reator anaeróbio operado em batelada sequencial, em escala piloto, com volume total de 280 L, no tratamento de águas residuárias de suinocultura. As cargas orgânicas volumétricas aplicadas no reator foram de 4,42; 5,27; 9,33 e 11,79 g DQO_{total} (L d)⁻¹. As eficiências médias de remoção de DQO_{total}, sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV) variaram de 56 a 87%. O nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo total (P-total) e magnésio (Mg) foram removidos com eficiências médias de 26 a 39%. As produções volumétricas de metano variaram de 0,50 a 0,64 L CH₄ (L reator d)⁻¹ e não foram observadas diferenças significativas. As relações sólidos voláteis/sólidos totais (SV/ST) do lodo de tal reator variaram de 0,74 a 0,58. As maiores concentrações médias de nutrientes no lodo do reator foram para o nitrogênio, fósforo, ferro e cálcio, com valores de 30.610 a 64.400, 1.590 a 9.870, 6.180 a 8.700 e 1.180 a 6.760 mg kg⁻¹ base seca, respectivamente.

Palavras-chave: dejetos de suínos; digestão anaeróbia; metano; nutrientes; carga orgânica volumétrica.

Abstract

In the present study, we evaluated an anaerobic sequencing batch reactor, in pilot scale and with a total volume of 280 L, for the treatment of swine wastewater. The organic loading rates applied in such reactor were 4.42; 5.27; 9.33 and 11.79 g COD_{total} (L d)⁻¹. The average efficiencies of removal of COD_{total}, total solids suspension (TSS) and volatile suspension solids (VSS) varied from 56 to 87%. The nutrients total Kjeldahl nitrogen (TKN), total phosphorus (total P) and Mg were removed with average efficiencies from 26 to 39%. The volumetric methane productions varied from 0.50 to 0.64 L CH₄ (L reactor d)⁻¹ and did not present significant differences. The VS/TS relations of the aforementioned reactor's sludge varied from 0.74 to 0.58. The highest mean concentrations of nutrients in the reactor sludge were those of nitrogen, phosphorus, iron and calcium, with values from 30.610 to 64.400, 1.590 to 9.870, 6.180 to 8.700 and 1.180 to 6.760 mg kg⁻¹ base dry, respectively.

Keywords: swine wastewater; anaerobic digestion; methane, nutrients; organic loading rates.

Introdução

A suinocultura é uma das principais atividades agropecuárias que vem aumentando nas últimas décadas a sua participação nos impactos provocados no ambiente. A adoção de sistemas confinados de produção, com o uso intensivo da água para higienização das instalações, resulta em grandes quantidades de dejetos líquidos, com concentrações de sólidos de 0,5 a 3,0% (FERNANDES; OLIVEIRA, 2006). Segundo a Pesquisa Agropecuária Municipal (IBGE, 2007) o plantel brasileiro de suínos é estimado em 35 milhões de cabeças, e o equivalente populacional médio em termos

de DBO_{5,20} é de 3,5 habitantes por suíno (LINDNER, 1999, *apud* MIRANDA, 2005).

As águas residuárias de suinocultura contêm altos teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, sódio, magnésio, manganês, ferro, zinco, cobre e outros elementos, incluídos nas dietas dos animais (LUDKE; LUDKE, 2002).

O tratamento biológico anaeróbio pode ser aplicado para resolver os problemas ambientais e de saúde pública associados às águas residuárias de suinocultura com altas cargas orgânicas, com as vantagens da produção de metano, baixa produção de lodo, facilidade na integração com o sistema de manejo de águas residuárias (NDON;

DAGUE, 1997), conservação dos nutrientes e redução dos odores (AHN *et al.*, 2006).

Como alternativa aos reatores anaeróbios de fluxo contínuo, houve o desenvolvimento do reator anaeróbio operado em batelada sequencial (ASBR, do inglês *anaerobic sequencing batch reactor*), com a realização de várias pesquisas que visam a sua aplicação prática no tratamento de resíduos sólidos e semissólidos (10 a 20% de sólidos totais) e de águas residuárias (DAGUE *et al.*, 1992; MASSE *et al.*, 2003, 2007; NDON; DAGUE, 1997; SHIZAS; BAGLEY, 2002; ZHANG *et al.*, 1997; MALTA-ALVAREZ, 2003). O ASBR tem algumas vantagens, como a eliminação da sedimentação secundária, boa retenção de biomassa, simplicidade de operação e flexibilidade (RODRIGUES *et al.*, 2003; SHIZAS; BAGLEY, 2002). No ASBR, utiliza-se o processo anaeróbio de alta taxa para estabilizar águas residuárias, para controlar odores e produzir biogás como fonte alternativa de energia (NDON; DAGUE, 1997), além da possibilidade do uso agrícola do lodo excedente.

O tratamento biológico no ASBR é realizado em uma única unidade por meio de uma sequência operacional (ciclo), composta de quatro etapas distintas: alimentação, reação, sedimentação e descarte. A retenção de biomassa granular é um importante aspecto no ASBR e possibilita altas remoções de sólidos orgânicos, com baixos tempos de detenção hidráulica (NDON; DAGUE, 1997). Além dos aspectos físicos, os constituintes químicos e as propriedades da biomassa – que podem afetar a viabilidade da aplicação no solo do efluente e do lodo de forma benéfica – também devem ser conhecidos, e abrangem a matéria orgânica, os nutrientes, os micro-organismos patogênicos, os metais pesados e os componentes tóxicos (METCALF; EDDY, 2003).

Considerando-se as características do ASBR, foram realizados vários trabalhos com a sua aplicação para os resíduos da suinocultura. Zhang *et al.* (1997) utilizaram um reator de 12 L, com a aplicação de

carga orgânica volumétrica (COV) de 0,9 a 5,5 g SV (L d)⁻¹ e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 2, 3 e 6 dias, com o afluente com sólidos voláteis (SV) de 2,7 a 17 g L⁻¹, e obtiveram reduções de SV de 39 a 61%, de DBO₅ de 59 a 86% e produção volumétrica de biogás de 0,4 a 2,3 L (L reator d)⁻¹, respectivamente. Masse *et al.* (2003) trabalharam com reator de 42 L, com COV de 1,2 g DQO_{total} (L d)⁻¹, TDH de 28 dias e temperatura de 20°C no tratamento de afluente com DQO_{total} de 49 g L⁻¹ e obtiveram eficiências de remoção de DQO_{total} de 89%. Masse *et al.* (2007) operam um reator de 41 L, com TDH de 4 semanas, COV de 4 g DQO_{total} (L d)⁻¹ e temperatura de 20°C, com afluente com DQO_{total} de 131 g L⁻¹ e obtiveram eficiências médias de remoção de DQO_{total} de 58 a 73%. A utilização do ASBR para a suinocultura com manejo de dejetos líquidos, em regiões sob clima tropical e subtropical depende do conhecimento da influência das condições operacionais (TDH e COV) e ambientais (temperatura) e das características do afluente e qualidade do efluente.

Portanto, neste trabalho foi avaliado o efeito do aumento da COV de 4,4 a 11,8 g DQO_{total} (L d)⁻¹ com a variação da temperatura média do ar no desempenho de um ASBR, quanto à remoção de matéria orgânica, nutrientes, coliformes termotolerantes, produção de metano e características do lodo, no tratamento de águas residuárias de suinocultura, com concentrações de sólidos suspensos totais em torno de 10.000 mg L⁻¹.

Material e métodos

Local

A unidade experimental utilizada para o tratamento das águas residuárias de suinocultura foi constituída por uma bomba centrífuga, um depósito de dejetos de suínos (afluente) e um ASBR em escala piloto. No local da instalação do ASBR, o clima, segundo a classificação de Koppen, é subtropical úmido, seco no inverno e com chuva no verão, com temperatura média anual de 21°C.

Instalações experimentais

O ASBR foi construído com um tubo de PVC comercial, com diâmetro de 500 mm e com volume total de 280 L (Figura 1). O volume livre, reservado para o acúmulo de biogás, na parte superior do ASBR, foi de 14% do volume total do reator (40 L). Para a monitorização da produção de biogás foram instalados gasômetros, conforme descrito por Fernandes e Oliveira (2006). No ASBR foi instalado um sistema de agitação mecânica, composto por três impelidores, eixo e moto-reductor, e temporizador para o acionamento intermitente. Durante a etapa de reação, o sistema de agitação mecânica foi acionado intermitentemente (15 minutos por hora), com velocidade de 20 a 25 rotações por minuto (rpm), resultando num gradiente de velocidade (G) em torno de 100 s⁻¹.

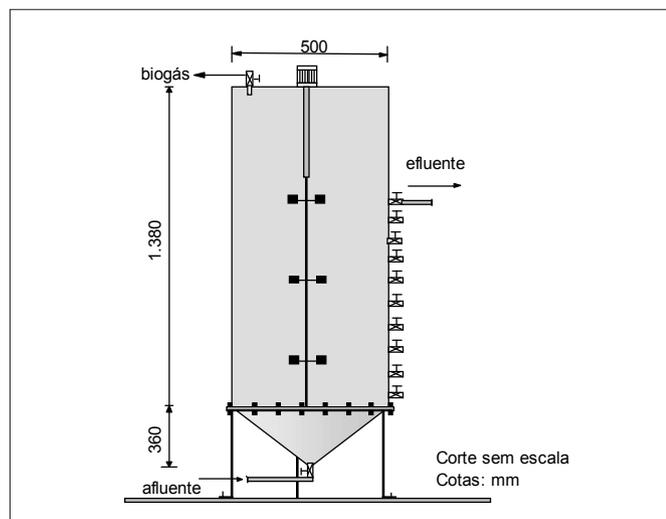


Figura 1 – Representação esquemática do reator ASBR em escala piloto, com volume de 280 L

Condições operacionais e afluente

O experimento foi dividido em quatro ensaios, variando-se o TDH no ASBR, conforme descrito na Tabela 1.

Os dejetos de suínos utilizados como afluente no ASBR foram coletados diariamente no Setor de Suinocultura da Unesp, Jaboticabal (SP). Os dejetos foram coletados em confinamento de suínos, na fase de crescimento e terminação, com lâmina d'água nas baias. Após a coleta os dejetos de suínos foram peneirados (peneira com malha quadrada de 3 mm) para retirada dos sólidos grosseiros.

O TDH foi calculado dividindo-se o volume útil do reator pelo volume de alimentação diário, conforme descrito por SHIZAS E BAGLEY (2002) e PINHEIRO *et al* (2008). A avaliação de desempenho da unidade experimental se baseou na monitorização da água residuária de suinocultura bruta afluente e do efluente tratado no

ASBR, em amostras simples, perfazendo 15 amostragens para cada TDH aplicado.

Delineamento experimental, exames e determinações

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (TDH de 96, 72, 48 e 36 horas) e 15 repetições para o afluente e efluente, 55 repetições para a produção volumétrica de metano e temperatura média do ar e oito repetições para sólidos totais e voláteis do lodo. Os valores dos parâmetros determinados, descritos na Tabela 2, foram submetidos à análise de variância pelo teste F, utilizando-se para a comparação das médias, o teste de Tukey a 5%. As repetições foram as amostragens no tempo. Às médias das eficiências de remoção foi aplicada análise de regressão polinomial.

Tabela 1 – Distribuição dos tempos do ciclo operacional e volumes de afluente para cada condição operacional do ASBR

Características	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Volume de alimentação diário (L)	60	80	120	160
Tempo de detenção hidráulica (h)	96	72	48	36
Tempo do ciclo (h)	24	24	12	12
Tempo de alimentação (h)	0,17	0,17	0,17	0,17
Tempo de reação (h)	19,00	19,00	9,00	9,00
Tempo de sedimentação (h)	4,66	4,66	2,66	2,66
Tempo de retirada do sobrenadante (h)	0,17	0,17	0,17	0,17

Tabela 2 – Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas

Exames e determinações	Frequência	Referências
Afluente e efluentes		
Temperatura média do ar	diária	Unesp, Jaboticabal - Estação Agroclimatológica
pH e alcalinidade total (AT)	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998)
Ácidos voláteis totais	duas vezes por semana	Dilallo e Albertson (1961)
Sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV)	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998)
Demanda química de oxigênio (DQO _{total}); DQO das frações dissolvida (DQO _{diss.}) e de sólidos suspensos (DQO _{ss})	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998); Santana e Oliveira (2005) (digestão com refluxo fechado e método colorimétrico).
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998) (obtenção do extrato utilizando-se a digestão com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio no equipamento Digesdahl, conforme instruções do fabricante-Hach e posterior utilização do método semimicro Kjeldahl).
Nitrogênio amoniacal (N-am.) e Nitrogênio orgânico (N-org. = NTK - N-am)	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998) (método semi-micro Kjeldahl).
Fósforo total (P total)	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998) (obtenção do extrato conforme descrito para o NTK e posterior utilização do método colorimétrico empregando metavanadato e molibdato de amônio).
Potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês, sódio e zinco	duas vezes por semana	APHA, AWWA, WPCF (1998) (obtenção do extrato conforme descrito para o NTK e posterior leitura em espectrofotômetro de absorção atômica).
Coliformes totais e termotolerantes	duas vezes por ensaio	APHA, AWWA, WPCF (1998) (técnica dos tubos múltiplos)
Biogás		
Produção	diária	Oliveira (1997) (gasômetros)
Composição	quinzenal	APHA, AWWA, WPCF (1998) (cromatografia gasosa).
Lodo		
Sólidos totais (ST) e voláteis (SV)	semanal	APHA, AWWA, WPCF (1998)
Nitrogênio total, fósforo total, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês, níquel, sódio e zinco	uma vez por ensaio	APHA, AWWA, WPCF (1998) (idem aos métodos descritos para as determinações no afluente e efluentes).

Resultados e discussão

Na Tabela 3, observa-se que, entre as temperaturas médias do ar e as COV aplicadas no ASBR, ocorreram diferenças significativas. As maiores e menores temperaturas climatológicas médias de 24,1°C e de 19,2°C foram observadas com os TDH de 96 e 48 horas, respectivamente.

Para os valores médios de pH (de 5,7 a 6,0) (Tabela 3), DQO_{total} (de 15.835 a 18.848 mg L⁻¹), DQO_{ss} (de 13.490 a 15.264 mg L⁻¹) e SST (de 9.219 a 10.696 mg L⁻¹) do afluente e da produção volumétrica de metano (de 0,50 a 0,64 m³ CH₄ (m³ reator d⁻¹)) do ASBR (Tabela 4), não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$).

Os valores médios da DQO_{total} (de 2.756 a 8.038 mg L⁻¹), DQO_{diss} (de 508 a 1.758 mg L⁻¹), DQO_{ss} (de 3.197 a 6.280 mg L⁻¹), SST

Tabela 3 – Valores médios do pH, da temperatura média do ar, AT e AVT no afluente e efluente do ASBR durante os ensaios

Parâmetros		Tempo de detenção hidráulico (h)				CV (%)	Teste F				
		96	72	48	36						
Temperatura (°C)	-	24,1	a	22,5	b	19,2	c	22,4	b	9,3	47,2**
COV (g DQO_{total} (L d ⁻¹))	-	4,42	b	5,27	b	9,33	a	11,79	a	36,7	22,4**
pH	Afluente	5,7	a	5,8	a	5,9	a	6,0	a	7,6	1,5 ns
	Efluente	7,4	a	7,2	ab	6,9	b	7,4	a	4,7	6,6**
AT (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Afluente	1.358	a	909	b	1.132	ab	1.342	a	35,7	3,7*
	Efluente	2.090	a	1.996	c	1.641	bc	2.075	ab	24,7	5,2**
AVT (mg CH ₃ COOH L ⁻¹)	Afluente	1.465	a	919	b	1.134	ab	1.321	ab	35,1	4,65**
	Efluente	357	b	194	c	509	a	226	bc	47,5	13,1**

Letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem pelo teste de Tukey a 5%; ** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ns: não-significativo ($p > 0,05$); p: probabilidade; COV: carga orgânica volumétrica; AT: alcalinidade total; AVT: ácidos voláteis totais.

Tabela 4 – Valores médios DQO_{total} , DQO_{diss} , DQO_{ss} , SST, SSV e dos coliformes termotolerantes no afluente e efluente; das eficiências de remoção de DQO_{total} , DQO_{diss} , DQO_{ss} , SST e SSV e da volumétrica de metano do ASBR durante os ensaios

Parâmetros		Tempo de detenção hidráulica (h)				CV (%)	Teste F				
		96	72	48	36						
DQO_{total} (mg L ⁻¹)	Afluente	17.727	a	15.835	a	18.674	a	18.848	a	31,8	0,89 ns
	Efluente	2.756	b	3.705	b	8.038	a	4.415	b	65,4	8,3**
	Eficiência (%)	84	a	68	ab	56	b	75	a	27,0	5,6**
DQO_{diss} (mg L ⁻¹)	Afluente	2.632	b	2.345	b	3.410	ab	3.977	a	37,5	6,2**
	Efluente	888	b	508	b	1.758	a	989	b	50,3	15,1**
	Eficiência (%)	63	ab	78	a	48	b	75	a	25,8	9,3**
DQO_{ss} (mg L ⁻¹)	Afluente	14.892	a	13.490	a	15.264	a	14.859	a	34,8	0,35 ns
	Efluente	1.868	b	3.197	b	6.280	a	3.426	ab	82,2	5,6**
	Eficiência (%)	87	a	71	ab	58	b	77	ab	29,1	4,8**
SST (mg L ⁻¹)	Afluente	10.696	a	9.967	a	9.406	a	9.219	a	32,1	0,6 ns
	Efluente	1.553	b	1.611	b	3.954	a	1.985	b	68,2	8,0**
	Eficiência (%)	85	a	82	a	56	b	75	a	24,0	7,7**
SSV (mg L ⁻¹)	Afluente	7.459	a	5.247	ab	5.713	ab	4.978	b	40,6	3,3*
	Efluente	1.157	b	910	b	2.332	a	1.157	b	66,5	7,1**
	Eficiência (%)	84	a	80	a	59	b	73	ab	24,1	5,6**
Produção volumétrica de metano (L CH ₄ (L reator CH ₄ d ⁻¹))		0,534	a	0,64	a	0,538	a	0,5	a	31,9	1,7ns
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Afluente	1,4x10 ⁷		4,0x10 ⁷		1,6x10 ⁸		7,4x10 ⁶		-	-
	Efluente	9,0x10 ⁴		2,5x10 ⁶		1,3x10 ⁷		7,5x10 ⁵		-	-
	Eficiência (%)	99,35		93,75		91,87		89,86		-	-

Letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem pelo teste de Tukey a 5%; ** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ns: não-significativo ($p > 0,05$); p: probabilidade; DQO_{total} : demanda química de oxigênio total; DQO_{diss} : demanda química de oxigênio dissolvida; DQO_{ss} : demanda química de oxigênio devido aos sólidos suspensos; SST: sólidos suspensos totais; SSV: sólidos suspensos voláteis (SSV).

(de 1.553 a 3.954 mg L⁻¹) e SSV (de 910 a 2.332 mg L⁻¹) no efluente diminuíram acentuadamente ($p < 0,01$), indicando o efeito da variação do TDH e da temperatura climatológica no desempenho do ASBR para a remoção de matéria orgânica (Tabela 4).

Na Tabela 4 e na Figura 2, pelas linhas de tendência, observa-se que as maiores eficiências de remoção de DQO_{total}, de 84 e 75%, ocorreram com os TDH de 96 e 36 horas, respectivamente, indicando resposta quadrática. As variações das eficiências de remoção de DQO_{ss} foram semelhantes às observadas para a DQO_{total}, em razão dos altos níveis de DQO_{ss} na composição da DQO_{total}. Para a DQO_{diss}, as maiores eficiências de remoção de 78 e 75%, foram verificadas com o TDH de 72 e 36 horas, respectivamente. Os valores obtidos para a DQO_{total} nos ensaios com TDH de 72, 48 e 36 horas, quando ocorreram as temperaturas médias do ar de 22,5; 19,2 e 22,4 °C foram similares às observadas por Masse *et al* (2007), mesmo com TDH até 19 vezes inferiores.

Para as eficiências médias de remoção de DQO_{total}, DQO_{diss}, DQO_{ss}, SST e SSV, não foram observadas diferenças significativas ($p < 0,01$) (Tabela 4), e os menores valores de 56; 48; 58, 56 e 59% ($p < 0,05$), respectivamente, foram provocados pela menor temperatura média do ar de 19,2°C, que ocorreu durante a operação com o TDH de 48 horas. Segundo Masse *et al* (1997), o decréscimo da temperatura diminui a atividade dos microrganismos anaeróbios, afetando o desempenho do ASBR para a remoção de matéria orgânica e dos sólidos suspensos.

Na Figura 3, pelas linhas de tendência, observa-se que ocorreu uma resposta linear para as eficiências de remoção dos SST e dos SSV, ou seja, com o aumento do TDH houve aumento na eficiência de remoção de SST e de SSV.

Os valores médios dos números de coliformes termotolerantes no afluente variaram de $7,4 \times 10^6$ a $1,6 \times 10^8$ NMP/100 mL. No efluente, os coliformes termotolerantes variaram de $9,0 \times 10^4$ a $1,3 \times 10^7$ NMP/100 mL (Tabela 4).

No ASBR com o aumento do TDH de 36 para 96 horas e o decréscimo da COV de 11,79 para 4,42 g DQO_{total} (L d)⁻¹, foi observado aumento nas eficiências médias de remoção de coliformes termotolerantes de 89,86 para 99,35%. As concentrações nos efluentes mantiveram-se acima de $9,0 \times 10^4$ NMP/100 mL, restringindo a aplicação das águas residuárias tratadas para a irrigação de plantas, tomando-se por base os valores estabelecidos nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (1989, 2006) e na resolução nº 357 de 17 de março de 2005 do Conama (BRASIL, 2005), na qual estão definidos os limites de coliformes termotolerantes de 200, 1000 e 4000 NMP/100 mL em corpos d'água doce de classe 1, 2 e 3, dos quais podem ser captadas águas para irrigação.

Durante os ensaios, os valores médios de NTK, N-am., N-org. e P-total no afluente variaram de 752 a 1116 mg L⁻¹, 164 a 274 mg L⁻¹; 631 a 858 mg L⁻¹ e de 338 a 448 mg L⁻¹, respectivamente (Tabela 5). Costa E Medri (2002) observaram concentrações de NTK e P-total

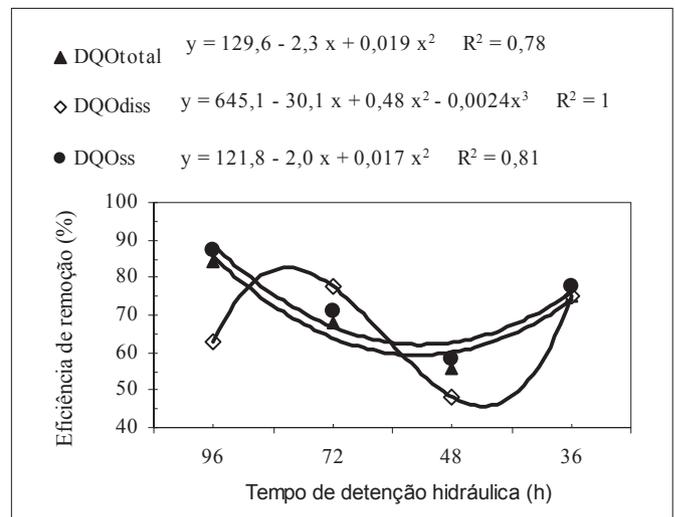


Figura 2 – Tempo de detenção hidráulica (TDH) versus eficiências de remoção (%) de DQO_{total}, DQO_{diss} e DQO_{ss} no ASBR

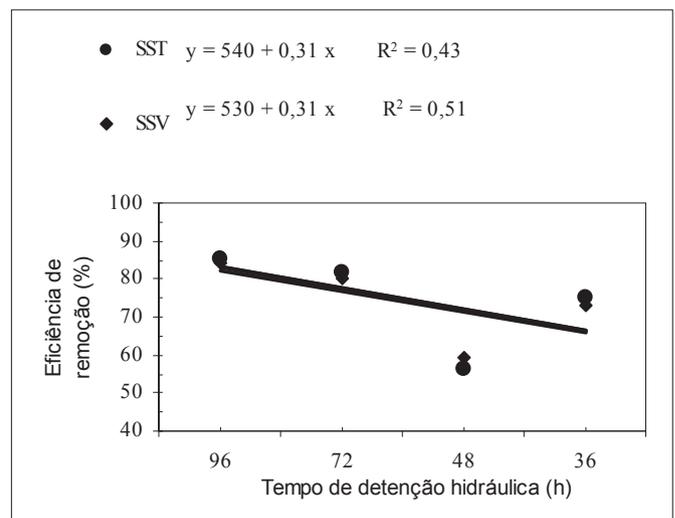


Figura 3 – Tempo de detenção hidráulica (TDH) versus eficiências de remoção (%) de SST e SSV no ASBR

próximas às observadas neste trabalho, de 1.825 mg L⁻¹ e 391 mg L⁻¹, respectivamente, em águas residuárias de suinocultura com DQO_{total} de 15.153 mg L⁻¹.

As eficiências médias de remoção do ASBR foram de 31 a 39% para o NTK, 59 a 80% para o N-org. e de 32 a 38% para o P-total. Observa-se que as menores eficiências de remoção de N-org. de 59% e 65% ocorreram quando se aplicaram as maiores COV de 11,79 e 9,33 g DQO (L d)⁻¹, e com as menores temperaturas, provocando decréscimo na digestão de material proteico (Tabelas 3 e 5). As eficiências de remoção de P-total observadas neste estudo foram superiores às observadas por MASSE *et al* (2007), de 25,5%; tratando águas residuárias de suinocultura em um ASBR com COV de 0,14 g DQO_{total} (L d)⁻¹.

No ASBR observaram-se eficiências de remoção de 45 a 63% para o cálcio (Ca). Não foram observadas remoções de sódio (Na) e potássio (K) (Tabela 6).

Tabela 5 – Valores médios das COV aplicadas no ASBR e das concentrações e eficiências médias de remoção de NTK, N-am., N-org. e P-total do afluente e efluentes do ASBR durante os ensaios

Parâmetros	Tempo de detenção hidráulica (h)								CV (%)	Teste F	
	96	72	48	36	96	72	48	36			
COV (gDQO _{total} (L d) ⁻¹ -	4,42	b	5,27	b	9,33	a	11,79	a	36,7	22,4**	
NTK (mg L ⁻¹)	Afluente	987	ab	752	a	1116	a	905	ab	34,1	3,5*
	Efluente	612	a	419	b	665	a	669	a	30,3	6,8**
	Eficiência (%)	37	a	39	a	38	a	31	a	44,4	0,6 ns
N-am. (mg L ⁻¹)	Afluente	225	ab	164	b	258	a	274	a	29,0	8,2**
	Efluente	452	a	313	c	362	bc	426	ab	24,0	7,0**
N-org. (mg L ⁻¹)	Afluente	763	a	588	a	858	a	631	a	41,4	2,7 ns
	Efluente	159	bc	106	c	303	a	242	ab	65,3	6,8**
	Eficiência (%)	80	a	79	a	65	b	59	b	21,3	7,1**
P-total (mg L ⁻¹)	Afluente	428	a	393	a	488	a	338	a	41,5	1,9 ns
	Efluente	335	a	244	ab	317	ab	221	b	36,5	3,9*
	Eficiência (%)	32	a	36	a	35	a	38	a	49,3	0,2 ns

Letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem pelo teste de Tukey a 5%; **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ns: não-significativo ($p > 0,05$); p: probabilidade; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; N-am.: nitrogênio amoniacal; N-org.: nitrogênio orgânico; P-total: fósforo total.

Tabela 6 – Valores médios das concentrações e eficiências médias de remoção de K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn e Zn do afluente e efluentes do ASBR durante os ensaios

Parâmetros	Tempo de detenção hidráulica (h)								CV (%)	Teste F	
	96	72	48	36	96	72	48	36			
K (mg L ⁻¹)	Afluente	118	bc	59	c	152	b	292	a	43,1	32,3**
	Efluente	122	bc	59	c	154	b	309	a	49,9	25,3**
Ca (mg L ⁻¹)	Afluente	657	a	677	a	269	b	171	b	33,6	40,1**
	Efluente	268	a	324	a	139	b	63	b	36,5	33,5**
	Eficiência (%)	58	a	52	ab	45	b	63	a	21,2	5,9**
Mg (mg L ⁻¹)	Afluente	79	a	66	ab	46	c	57	c	30,3	7,8**
	Efluente	51	a	42	ab	33	b	38	b	25,2	7,5**
	Eficiência (%)	35	a	36	a	26	a	36	a	45,0	1,3 ns
Na (mg L ⁻¹)	Afluente	48	c	43	c	108	b	163	a	38,7	30,0**
	Efluente	48	c	31	c	85	b	143	a	43,6	32**
Cu (mg L ⁻¹)	Afluente	6,8	a	8,2	a	5,4	a	6,6	a	49,1	1,7 ns
	Efluente	1,4	a	1,8	a	2,0	a	2	a	70,6	0,7 ns
	Eficiência (%)	79	a	71	a	61	a	71	a	30,0	1,6 ns
Fe (mg L ⁻¹)	Afluente	25,5	a	20,3	a	27,0	a	27,4	a	43,3	1,3 ns
	Efluente	4,5	a	6,4	a	9,5	a	11,4	a	90,6	2,5 ns
	Eficiência (%)	82	a	68	a	60	a	69	a	33,2	2,1 ns
Mn (mg L ⁻¹)	Afluente	3,2	a	3,7	a	2,9	a	3,6	a	55,7	0,5 ns
	Efluente	1,1	a	1,2	a	1,4	a	1,4	a	55,6	0,7 ns
	Eficiência (%)	62	a	65	a	52	a	63	a	29,5	1,2 ns
Zn (mg L ⁻¹)	Afluente	11,1	a	9,1	a	9,2	a	7,1	a	47,9	1,9 ns
	Efluente	2,0	a	2,3	a	3,1	a	1,9	a	78	1,2 ns
	Eficiência (%)	81	a	71	a	67	a	73	a	31,0	1,0 ns

Letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem pelo teste de Tukey a 5%; **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ns: não-significativo ($p > 0,05$); p: probabilidade.

Tabela 7 – Valores médios e coeficientes de variação (CV) das concentrações de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do lodo sedimentado no ASBR, das taxas de carregamento orgânico do lodo (TCL) e do tempo de retenção de sólidos (TRS), durante os ensaios

Parâmetros	Tempo de detenção hidráulica (h)								CV (%)	Teste F
	96		72		48		36			
ST (g L ⁻¹)	3,5	a	6,8	a	4,8	a	3,5	a	61	2,1 ns
SV (g L ⁻¹)	2,4	a	4,0	a	3,5	a	5,3	a	73	1,4 ns
SV/ST	0,69	ab	0,58	b	0,74	a	0,70	ab	15	3,5*
TCL (gDQO (g SV d ⁻¹))	1,9	bc	1,7	c	3,5	a	2,7	ab	42	9,3**
TRS (d)	12,0	a	9,4	ab	3,0	b	5,1	ab	63	5,2**

Letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem pelo teste de Tukey a 5%; ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ns: não-significativo.

As concentrações médias de Fe no afluente variaram de 20,34 a 27,40 mg L⁻¹; de zinco (Zn), de 7,13 a 11,12 mg L⁻¹; de cobre (Cu), de 5,40 a 8,26 mg L⁻¹; de manganês (Mn), de 2,94 a 3,5 mg L⁻¹. As concentrações médias de ferro (Fe) no efluente do ASBR durante os quatro ensaios variaram de 4,5 a 11,1 mg L⁻¹; de Zn, de 1,9 a 3,0 mg L⁻¹; de Cu, de 1,4 a 2,0 mg L⁻¹; de Mn, de 1,1 a 1,4 mg L⁻¹ (Tabela 6). As concentrações de Fe e Zn no efluente do ASBR, em todos os ensaios, foram menores que valores máximos contidos no padrão de lançamento de efluentes estabelecido na resolução n° 357 do Conama (BRASIL, 2005), que é de 15 mg L⁻¹ para o Fe e de 5 mg L⁻¹ para o Zn.

Não foram observadas diferenças significativas entre as eficiências de remoção de NTK, P-total, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn com a variação das COV nos ensaios ($p > 0,05$). Resultados semelhantes para o P-total e o NTK, com remoções de 13% para o P-total e de 20% para o NTK, foram observados por Nedegwa *et al* (2008), tratando águas residuárias de suinocultura em um reator ASBR com volume de 12 L e com COV variando de 0,4 a 1,2 g DQO (L d⁻¹). Os autores atribuíram esse resultado à capacidade do sistema de tratamento anaeróbio de preservar os nutrientes em virtude da pequena imobilização de nitrogênio e fósforo no lodo anaeróbio.

Observaram-se eficiências médias de remoção de 60 a 82% para o Fe, de 67 a 81% para o Zn, de 61 a 79% para o Cu e de 52 a 65% para o Mn. Masse *et al* (2007) verificaram eficiências médias de remoção menores (de 15% para o Fe; 41,5% para o Cu; 21% para o Mn e 18,4 % para o Zn) em um ASBR tratando águas residuárias de suinocultura mesmo com COV menor (de 0,14 g DQO_{total} (L d⁻¹) do que as aplicadas nos ensaios 1 e 4.

Os valores médios das concentrações de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do lodo sedimentado no ASBR foram baixos (Tabela 7), comparando-se com os valores obtidos para lodo de reatores anaeróbios, UASB e compartimentado (ABR), na faixa de 4 a 79 g L⁻¹ de SV (SANTANA, 2004; FERNANDES, 2004), tratando águas residuárias de suinocultura com SST de 2 a 7 g L⁻¹ e COV similares às utilizadas nos ensaios 1 a 4.

Os valores médios da relação SV/ST para o lodo do R1 foram de 0,69; 0,58; 0,74 e 0,70 durante os ensaios 1, 2, 3 e 4,

respectivamente (Tabela 7). As altas relações SV/ST evidenciam a predominância de matéria orgânica no lodo, e consequentemente da presença de microrganismos, considerando-se a produção de metano obtida (de 0,50 a 0,64 L (L reator d⁻¹)). (OLIVEIRA *et al*, 1997). Além disso, segundo a resolução n° 375 de 29 de agosto de 2006, do Conama (BRASIL, 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 – o que não foi obtido somente com TDH de 48 horas, em virtude da ocorrência de temperaturas médias na faixa psicrófila, provocando o decréscimo da atividade da microbiota do lodo.

Os valores médios das taxas de carregamento orgânico no lodo (TCL) do ASBR foram de 1,9; 1,7; 3,5 e 2,7 g DQO_{total} (g SV_{lodo} d⁻¹) com os TDH de 96, 72, 48 e 36 horas, respectivamente (Tabela 7). A TCL, durante o regime permanente e de acordo com o tipo de água residuária a ser tratada, pode atingir valores em torno de 2,0 kg DQO_{total} (kg SV_{lodo} d⁻¹) em reatores anaeróbios (CHERNICHARO, 1997).

A aplicação de valores médios de TCL de até 2,7 g DQO_{total} (g SV_{lodo} d⁻¹) no ASBR com TDH de 96, 72, 48 e 36 horas e temperaturas médias de aproximadamente 23°C, não foram limitantes para a obtenção de eficiências médias de remoção de DQO_{total} e SSV acima de 68% e produção volumétrica de metano de 0,50 a 0,64 L CH₄ (L reator d⁻¹). Para o TDH de 48 horas, com temperatura média em torno de 19°C e TCL de 3,5 g DQO_{total} (g SV_{lodo} d⁻¹), houve decréscimo significativo nas eficiências de remoção de DQO_{total} e SSV, que foram em torno de 55%, e da produção volumétrica de metano de 0,53 L CH₄ (L reator d⁻¹).

O tempo de retenção de sólidos (TRS) no ASBR foi de 12,0; 9,4; 3,0 e 5,1 d, nos ensaios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Com o aumento da COV nos ensaios 1, 2 e 4, houve diminuição do TRS no ASBR. De acordo com Ndon E Dague (1997), o aumento da COV provoca maior produção de microrganismos dispersos e consequentemente o decréscimo do TRS.

Segundo Zhang *et al* (1997), com o aumento da COV, o decréscimo do TRS ocorre em virtude do aumento de sólidos suspensos no reator, que pode diminuir a sedimentação do lodo e consequentemente

Tabela 8 – Valores médios das concentrações de N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn e Zn no lodo sedimentado coletado no ASBR ao final dos ensaios

Nutrientes (mg/kg base seca)	Tempo de detenção hidráulica (h)			
	96	72	48	36
N	64.400	30.610	39.900	62.400
P	4.470	9.870	1.590	3.481
Ca	6.760	5.970	4.040	1.180
Mg	440	370	170	347
Na	130	120	40	450
K	290	120	160	190
Fe	8.040	8.700	7.410	6.180
Cu	950	490	550	1.250
Zn	1.070	600	630	1.370
Mn	310	256	180	510

aumenta o arraste de lodo com o efluente. Schmit e Dague (1993), tratando águas residuárias de suinocultura em ASBR e aplicando COV de 3,31 a 5,37 g SV (L d)⁻¹, encontraram TRS de 18,04 a 8,52 dias. Os autores observaram que a diminuição da COV e o aumento do TDH resultaram em maiores TRS, o que também foi observado neste trabalho.

Com as baixas temperaturas, a viscosidade do fluido no reator aumenta, diminuindo a velocidade de sedimentação do lodo, especialmente dos microrganismos dispersos (NDON; DAGUE, 1997), o que pode ter ocorrido no ensaio 3, com TRS de 3,0 dias e temperaturas médias de 19,2 °C.

O TRS mínimo para o processo metanogênico é de aproximadamente 10 dias para a temperatura de 35°C (NDON; DAGUE, 1997). Nos ensaios 3 e 4, observaram-se valores abaixo do recomendado. O TRS de 5,1 d no ASBR, observado no ensaio 4, não foi limitante para a obtenção de altas eficiências médias de remoção de DQO_{total} e SST de 82 e 80%, respectivamente, e produção de metano de 0,5 L (L reator d)⁻¹.

As concentrações médias de N e P no lodo do ASBR, durante os ensaios, variaram de 30.610 a 64.400 e de 9.870 a 1.590 mg (kg base seca)⁻¹, respectivamente (Tabela 8).

O N, P, Fe e Ca foram os nutrientes encontrados em maiores concentrações no lodo no ASBR. Segundo Oliveira *et al* (1997), os mecanismos de precipitação no lodo podem ser a formação da estroviita (MgNH₄PO₄) e vivianita (Fe₃PO₄ · 8H₂O), além da hidroxiapatita

(CaHPO₄), as quais podem representar as formas de remoção de nutrientes com inclusão no lodo, principalmente N, P, Fe e Ca, das águas residuárias, como as provenientes da suinocultura.

As concentrações médias de Cu e Zn foram de 490 a 1.250; 600 a 1370 mg (kg base seca)⁻¹, respectivamente, no lodo do ASBR (Tabela 8). Segundo a resolução n° 375 do Conama, o lodo de esgoto e de produtos derivados, para o uso agrícola, deve respeitar os limites máximos de concentração de Cu e Zn de 1.500 e 2.800 mg (kg base seca)⁻¹, respectivamente. As concentrações de Mg, Na e K variaram de 40 a 450 mg (kg base seca)⁻¹ de lodo.

Conclusões

Com a utilização do ASBR, foi possível obter eficiências de remoção de DQO e sólidos suspensos de 50 a 87%, de NTK, P, e Mg de 30 a 39%, e de N-org, Ca, Cu, Fe, Mn e Zn de 50 a 82%, com produções de metano de 0,50 a 0,64 L CH₄ (L reator d)⁻¹, para COV de 4,4 a 11,8 g DQO_{total} (L d)⁻¹, indicando que o seu emprego com TDH de até 36 horas pode ser viável no tratamento de águas residuárias de suinocultura, principalmente em virtude da vantagem da operação intermitente. Com valores médios de temperatura do ar abaixo de 20°C, a obtenção de eficiências de remoção de DQO_{total} e sólidos suspensos acima de 60% exigirá a utilização de TDH maiores que 48 horas.

Os valores médios da relação SV/ST do lodo proveniente do ASBR foi de 0,58 a 0,74 e evidenciam a predominância de matéria orgânica no lodo e conseqüentemente da presença de microrganismos, considerando-se a produção de metano obtida (de 0,50 a 0,64 L (L reator d)⁻¹), e com características de estabilidade para o uso agrícola no solo (SV/ST inferior a 0,70), quando for descartado o excesso de lodo. As médias de Cu e Zn no lodo do ASBR de 490 a 1.250 e 600 a 1.370 mg (kg base seca)⁻¹, tomando-se por base os limites estabelecidos na resolução n° 375 do Conama, é possível o uso agrícola do lodo.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Tigre S/A Tubos e Conexões, pelo apoio financeiro.

Referências

- AHN, J.H *et al.* The effect of calcium on the anaerobic digestion treating swine wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, v. 30, p. 33-60, 2006.
- APHA, AWWA, WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. Washington, DC: APHA, 1998.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do meio Ambiente (Conama). *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, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005.
- _____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do meio Ambiente (Conama). *Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006*. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006.
- CHERNICHARO, C.A.L.. *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: Polytécnica, 1997.
- COSTA, R.H.R.; MEDRI, W. Modelling and optimisation of stabilisation ponds system for the treatment of swine wastes: organic matter evaluation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 385-392, 2002.
- DAGUE, R.R.; HABBEN, C.E.; PIDAPARTI, S.R. Initial studies on the anaerobic sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, Oxford, v. 26, n. 9-11, p. 2429-2432, 1992.
- DILALLO, R.; ALBERTSON, O.E. Volatile acids by direct titration. *Journal Water Pollution Control Federation*, Alexandria, v. 33, n. 4, p. 356-365, 1961.
- FERNANDES, G.F.R.; OLIVEIRA, R.A. Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura, *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 243-256, jan./jun. 2006.
- FERNANDES, G.F.R. *Desempenho de processo em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura*. 2004. 136. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Unesp, Jaboticabal, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, (IBGE). [Online]. Banco de dados agregados. Sistema IBGE de Recuperação Automática, SIDRA. Disponível em: <<http://sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 mar. 2008.
- LUDKE, J.V.; LUDKE, M.C.M.M. Preservação ambiental. *Suinocultura Industrial*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 10-14, 2002.
- MASSÉ, D.I.; CROTEAU, F.; MASSE, L. The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, Barking, v. 98, n. 15, p. 2819-2823, 2007.
- MASSÉ, D.I. *et al.* Potential for the psychrophilic anaerobic treatment of swine manure using a sequencing batch reactor. *Canadian Agricultural Engineering*, v. 1, n. 39, p. 25-33, 1997.
- MASSÉ, D.I.; MASSE, L.; CROTEAU, F. The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure. *Bioresource Technology*, Barking, v. 89, n. 1, p. 57-62, 2003.
- MATA-ALVAREZ, J. (Ed.) *Biomethanization of the organic fraction of municipal wastes*. London: IWA Publishing, 2003.
- METCALF, E. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- MIRANDA, C.R. de. *Avaliação de estratégias para sustentabilidade da suinocultura*. 2005. 264. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- NDEGWA, P.M. *et al.* Effects of cycle-frequency and temperature on the performance of anaerobic sequencing batch reactors (ASBRs) treating swine waste. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 6, p. 1972-1980, 2008.
- NDON, U.J.; DAGUE, R.R. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic sequencing batch reactor in the treatment of low-strength wastewater. *Water Research*, Oxford, v. 31, n. 10, p. 2455-2466, 1997.
- OLIVEIRA, R.A.; VAZOLLER, R.F.; FORESTI, E. *Sludge bed characteristics of UASB reactors: growth, activity, microbial structure, and chemical composition of granules*. In: 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ANAEROBIC DIGESTION, *Proceedings...* Sendai, Japan: IAWQ, p. 524-531, 1997.
- PINHEIRO, D.M. *et al.* Fluidized ASBR treating synthetic wastewater: Effect of recirculation velocity. *Chemical Engineering and Processing*, v. 47, n. 2, p. 184-191, 2008.
- RODRIGUES, R.S.; SELBACH, P.A. Redução de carga poluidora em lodo de suinocultura através de filtração. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v. 9, n. 4, p. 407-411, 2003.
- SANTANA, A.M. *Atividade da microbiota e desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura*. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Unesp, Jaboticabal, 2004.
- SANTANA, A.M. OLIVEIRA, R.A. Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 817-830, 2005.
- SCHMIT, C.G.; DAGUE R.R. Anaerobic sequencing batch reactor treatment of swine wastes at 20° C, 25° C, and 35° C. In: 48th PURDUE UNIVERSITY Industrial Waste Conference, *Proceedings...* Chelsea: Ann Arbor Press, p. 541-549, 1993.

SHIZAS, I.; BAGLEY, D.M. Improving anaerobic sequencing batch reactor performance by modifying operational parameters. *Water Research*, Oxford, v. 36, n. 1, p. 363-367, 2002.

WORD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Technical Report Series, 778. Geneva: WHO, 1989.

WORD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - policy and regulatory aspects*. v. 1. Geneva: WHO, 2006.

ZHANG, R.H. *et al.* Anaerobic treatment of swine waste by the anaerobic sequencing batch reactor. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 40, n. 3, p. 761-767, 1997.