

Artigo Técnico

Avaliação da produção de biogás de dejetos de suínos utilizando a metodologia de superfície de resposta

Evaluation of biogas production of swine waste using response surface methodology

Adriano Cancelier¹, Ubiridiana Patrícia Dal' Soto², Murilo Cesar Costelli³,
Toni Jefferson Lopes⁴, Adriano da Silva⁵

RESUMO

O presente estudo avaliou as condições operacionais que podem maximizar a produção do biogás a partir do uso de biodigestores. Os ensaios experimentais foram conduzidos utilizando dejetos de suínos em fase de terminação, com concentração de sólidos totais na coleta de 70,6% p/v. Os experimentos avaliaram, segundo a metodologia de superfície de resposta (MSR), a influência de cinco fatores: temperatura, concentração inicial de matéria orgânica e influência da adição de nutrientes inorgânicos ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{MnSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$). Os melhores resultados foram obtidos para a concentração de biomassa inicial de 395 a 595 g.L^{-1} e a temperatura de 33,5 a 44°C. Em relação ao uso de nutrientes no processo de biodigestão anaeróbia, os resultados permitiram concluir que houve significativa redução no tempo de retenção hidráulica (TRH) e maior produtividade de biogás.

Palavras-chave: dejetos; ambiente; suinocultura; biodigestor.

ABSTRACT

This study evaluated the operational conditions that maximize the production of biogas from the use of digesters. Experimental tests were conducted using termination phase swine wastes, with total solids in collecting 70.6% w/v. The experiments evaluated according to the response surface methodology (RSM), the influence of five factors: temperature, initial concentration of organic matter and influence of inorganic nutrients addition ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$). Better results were obtained for the initial concentration biomass of 395 to 595 g.L^{-1} and temperatures from 33.5 to 44°C. Regarding the use of nutrients in the anaerobic digestion process, the results showed that there was significant reduction in hydraulic retention time and increased biogas productivity.

Keywords: waste; environment; pig production; biodigester.

INTRODUÇÃO

Na suinocultura tem-se a geração de enormes quantidades de dejetos, principalmente resíduos sólidos, problema amplificado pelo sistema de produção altamente intensivo, que concentra grande quantidade de animais em pequenas áreas (KUNZ *et al.*, 2009). Os dejetos suínos apresentam pelos, vísceras, sangue, restos de carne e gordura e esterco que pertencem à Classe II A – não inerte, de acordo com a NBR 10004:2004. Também, pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010,

o resíduo sólido suíno é classificado quanto à origem (como resíduos agressivopastoris) e quanto à periculosidade (resíduo não perigoso).

Segundo Diesel *et al.* (2010), a capacidade poluente dos dejetos suínos, em termos comparativos, é muito superior à de outras espécies. Utilizando-se o conceito de equivalente populacional, um suíno equivale a 3,5 pessoas, em média. Além dos problemas já citados, no caso dos dejetos da suinocultura ainda se tem, no âmbito microrregional, o desconforto ambiental proveniente de insetos e maus odores

¹Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Doutor em Engenharia da Produção. Professor do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Santa Maria (RS), Brasil.

²Química pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ). Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Comunitária da Região de Chapecó (UNOCHAPECÓ) - Chapecó (SC), Brasil.

³Engenheiro Químico pela UNOCHAPECÓ. Mestre em Engenharia Química. Professor da Área de Ciências Exatas e Ambientais da UNOCHAPECÓ - Chapecó (SC), Brasil.

⁴Engenheiro de Alimentos pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Doutor em Engenharia Química. Professor da FURG, *Campus* Santo Antônio da Patrulha - Santo Antônio da Patrulha (RS), Brasil.

⁵Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Santa Catarina. Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da FURG, *Campus* Santo Antônio da Patrulha - Santo Antônio da Patrulha (RS), Brasil.

Endereço para correspondência: Adriano Cancelier - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química - Avenida Roraima, 1.000 - Camobi - 97105-900 - Santa Maria (RS), Brasil - E-mail: adriano.cancelier@ufsm.br

Recebido: 05/09/12 - **Aceito:** 03/10/14 - **Reg. ABES:** 101264

(BELLI FILHO *et al.*, 2007). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009), em 2009 o Brasil era o quinto maior produtor mundial de suínos, atrás apenas da China, dos Estados Unidos, da Alemanha e da Espanha. A Região Sul do Brasil concentrava 48,5% do rebanho brasileiro de suínos, sendo Santa Catarina o principal Estado produtor, com 21,0% dos animais.

Uma das alternativas que vêm despertando grande interesse é a tecnologia de biodigestão anaeróbia de resíduos, pela implantação de biodigestores. Esse processo proporciona o aproveitamento da biomassa para geração de energia (DINUCCIO *et al.*, 2010), além de constituir-se em uma alternativa para o tratamento de resíduos, pois além de reduzir o potencial poluidor e os riscos sanitários dos dejetos ao mínimo, promove a geração de biogás (DONG *et al.*, 2010; TEGHAMMAR *et al.*, 2010), o qual pode ser utilizado como fonte de energia alternativa (FARHAD *et al.*, 2010) e permite a reciclagem do efluente, podendo este ser usado como biofertilizante (ESPERANCINI *et al.*, 2007).

Na tecnologia de biodigestão anaeróbia de resíduos são encontradas algumas vantagens como: alta redução de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (DUMAS *et al.*, 2010), produção de biofertilizante (KUNZ *et al.*, 2009), pequena produção de lodo, baixos custos operacionais (HOFFMANN *et al.*, 2010) e de investimento (OMETTO *et al.*, 2007) e possibilidade de sistemas descentralizados de tratamento de resíduos (ANGONESE *et al.*, 2007).

Desse modo, este estudo propôs o uso de ferramentas de planejamento experimental, como a metodologia de superfície de resposta, para avaliar a influência de fatores operacionais e a necessidade de adição de nutrientes para maximizar a produção de biogás na digestão anaeróbia de dejetos de suínos.

METODOLOGIA

A principal matéria-prima utilizada para a execução deste trabalho consistiu de dejetos de suínos em fase de terminação cedidos por um produtor da região de Chapecó. Considerando que os

ingredientes das rações podem mudar de uma empresa para outra, optou-se por coletar as amostras em um mesmo dia, de modo a evitar que alguma substância usada na ração pudesse interferir no rendimento na produção de biogás. A coleta foi feita em um recipiente de grande porte e homogeneizada. Após, foi realizado o fracionamento da amostra em potes de 500 mL, sendo os recipientes armazenados em freezer a -5°C . Os dejetos coletados continham uma concentração de sólidos totais de 70,6% p/v.

Os nutrientes, compostos pelos sais hidratados $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{MnSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$, foram adquiridos comercialmente da empresa Vetec Química Fina Ltda. e utilizados como recebidos. A adição dos nutrientes era realizada no início do experimento, nas concentrações indicadas no planejamento, sendo feita a homogeneização dos mesmos com os dejetos.

O estudo foi realizado em duas etapas de experimentos. Na primeira etapa foram avaliados os efeitos da temperatura do meio e da concentração inicial de matéria orgânica; na segunda, a contribuição da adição de nutrientes sobre o tempo de retenção hidráulica (TRH) do processo e produção de biogás.

Os experimentos foram realizados em escala laboratorial em sistema batelada, conforme esquema apresentado na Figura 1. Foram utilizados biodigestores de bancada, compostos de erlenmeyers de 500 mL de capacidade unitária, sendo utilizados 500 mL de meio para biodigestão em cada experimento. Estes foram vedados contendo apenas a abertura para saída do biogás ao gasômetro. Os experimentos de biodigestão foram realizados em sistemas estáticos, em banho termostático tipo dubnoff, marca Nova Ética, modelo DI-921, equipado com controle de temperatura com precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

A medida do volume de biogás produzido foi feita com o auxílio de gasômetros. A metodologia empregada foi adaptada do trabalho de Souza *et al.* (2005). Os gasômetros eram compostos de provetas graduadas de 250 mL. Estas provetas foram inundadas em um recipiente que continha água e uma fina camada de óleo vegetal, impedindo-se, assim, a solubilização do biogás em água.

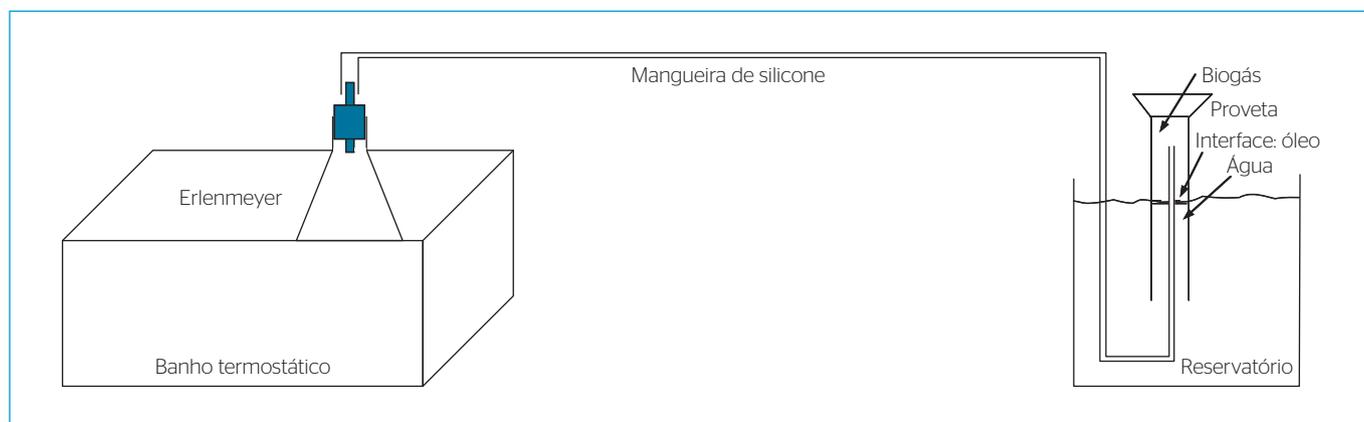


Figura 1 - Esquema da unidade experimental.

Planejamento experimental

O estudo da influência dos cinco fatores na produção de biogás foi realizado em duas etapas: (primeira etapa) avaliação da influência da concentração inicial de biomassa e temperatura; (segunda etapa) avaliação da influência dos três nutrientes testados. Como fonte de ferro utilizou-se o sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$), como fonte de níquel, o sulfato níqueloso hexahidratado ($\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$), e como fonte de manganês, o sulfato manganoso tetra hidratado ($\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$). Em cada experimento, o tempo total de biodigestão foi de 72 horas.

Com os valores obtidos experimentalmente foi analisada a significância de cada fator diante da variável resposta no processo de produção de biogás. Foi realizado um planejamento estrela com triplicata no ponto central, de maneira a possibilitar a descrição dos resultados por meio de um modelo linear ou quadrático empírico. O planejamento estrela é definido pelos níveis: $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ e $+\alpha$, onde α é obtido pela equação 1, em que n é o número de fatores.

$$a = \sqrt[4]{2^n} \quad (1)$$

Com os resultados obtidos durante a etapa de utilização do planejamento estatístico de delineamento composto central rotacional (DCCR), também chamado de estrela, foi obtido um modelo estatístico empírico para ser utilizado na previsão do valor da variável resposta no processo estudado, sendo considerada uma variável aleatória y , que se distribui em torno de uma média populacional $h(x_1, x_2)$, com uma variância populacional $s^2(x_1, x_2)$ (Equação 2), onde e é o desvio aleatório com que as observações flutuam em torno da média.

$$y(x_1, x_2) = \eta(x_1, x_2) + e(x_1, x_2) \quad (2)$$

Para este teste estatístico foi escolhido o modelo com os efeitos principais e secundários. Além disso, foi suposto que os desvios variam

segundo uma distribuição normal, sendo que, para o planejamento fatorial completo, a média populacional $h(x_1, x_2)$ pode ser representada por uma combinação linear das variáveis x_1 e x_2 (Equação 3).

$$\eta(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (3)$$

onde b_0 é o valor da média global das respostas e b_1 a b_5 representam os valores populacionais dos efeitos lineares e quadráticos dos efeitos principais e do efeito da interação, por unidade de x_1 e x_2 .

Os modelos estatísticos testados no ajuste dos valores obtidos experimentalmente foram avaliados segundo análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação. Também foi realizada a localização dos níveis de x_1, x_2, \dots, x_k , que maximizam a resposta estimada (predita). A análise estatística dos coeficientes, a influência dos fatores e suas interações sobre as respostas foram analisadas por intermédio da utilização do *software Statistica 6.0*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação da influência da concentração de biomassa e temperatura

Como etapa preliminar do estudo realizou-se um planejamento experimental para analisar o comportamento da concentração inicial de biomassa e da temperatura durante o processo de biodigestão anaeróbia diante de alguns fatores delimitados em níveis predefinidos. A Tabela 1 mostra a matriz de planejamento e a resposta obtida para cada ensaio, considerando um tempo total de biodigestão de 72 horas.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores obtidos para os efeitos referentes aos fatores concentração inicial de biomassa e temperatura para produção de biogás e seus respectivos índices estatísticos.

Tabela 1 - Matriz do planejamento estrela para os fatores temperatura e concentração inicial de biomassa, com suas respectivas respostas.

Ensaio	Temperatura (°C)	Concentração inicial de biomassa (g.L ⁻¹)	Volume de gás produzido (mL)
1	-1 (23)	-1 (115)	0,99
2	1 (37)	-1 (115)	46,44
3	-1 (23)	1 (435)	4,95
4	1 (37)	1 (435)	77,73
5	-1,41 (20)	0 (275)	1,98
6	1,41 (40)	0 (275)	62,18
7	0 (30)	-1,41 (50)	6,05
8	0 (30)	1,41 (500)	68,12
9	0 (30)	0 (275)	42,00
10	0 (30)	0 (275)	37,20
11	0 (30)	0 (275)	21,60

Tabela 2 - Cálculo dos efeitos e respectivos índices estatísticos para temperatura e concentração.

	Efeito	Desvio padrão	Valor p*	IC95%
Média	33,57	3,21	0,009	19,73-47,40
Temperatura (1)	50,93	7,55	0,021	18,43-83,43
Concentração de biomassa (2)	30,78	7,55	0,055	-1,71-63,28
Interação entre (1) e (2)	13,66	10,66	0,329	-32,23-59,56

*Em relação ao menor nível de significância adotado (5,0%).

De acordo com os índices estatísticos, apresentados na Tabela 2, pode-se afirmar que o termo linear da temperatura é significativo para o nível de confiança adotado de 95%, pois o fato de o intervalo de confiança (18,43–83,43) não conter o número zero indica que o fator em análise não apresenta efeito nulo, ou seja, é considerado significativo no nível de confiança testado. Além disso, também é possível observar que os valores dos efeitos dos fatores temperatura (50,93) e concentração de biomassa (30,78) são positivos, ou seja, isso indica que um aumento desses fatores provoca um aumento da resposta (volume de gás obtido). Comportamento similar foi observado por Sanchez *et al.* (2001) por intermédio de estudos (realizados em escala laboratorial em reatores de mistura perfeita, com temperatura ambiente e temperatura mesófila) sobre o efeito da concentração do substrato e variações de temperatura no lote de digestão anaeróbia de resíduos da suinocultura.

Na Figura 2 apresentam-se as curvas de nível correspondentes à superfície de resposta gerada pelo modelo linear, onde é possível observar o efeito provocado na resposta pelas duas variáveis avaliadas. Verifica-se que, com o aumento da concentração de biomassa e o aumento da temperatura, o volume de biogás produzido encontra-se num nível máximo na região delimitada pelo fator concentração inicial de biomassa: variando de 395 a 595 g.L⁻¹ (níveis 0,75 a 2,0) e temperatura de 33,5 a 44°C (níveis 0,5 a 2,0). O ajuste de um modelo linear com interações a este planejamento resulta na Equação 4.

$$V = 33,57 + 25,46T + 15,39C + 6,38TC \quad (4)$$

com R²=0,907, onde: T é a temperatura de reação, em °C, C é a concentração inicial de matéria orgânica, em g.L⁻¹, e V é o volume produzido de biogás nas CNTP, em mL.

A Tabela 3 mostra a análise de variância (ANOVA) do modelo obtido.

Na Tabela 3 pode-se observar que a soma quadrática dos erros é menor em relação aos outros valores obtidos, o que indica que o modelo é bom. Também é possível observar que o valor da distribuição de Fisher (distribuição F) calculado para os resíduos em relação à regressão é 5,23 vezes maior do que o valor da distribuição F tabelado. Desse modo, entende-se que a regressão é significativa, podendo ser usada para fins de predição (BARROS NETO *et al.*, 1996). Do mesmo

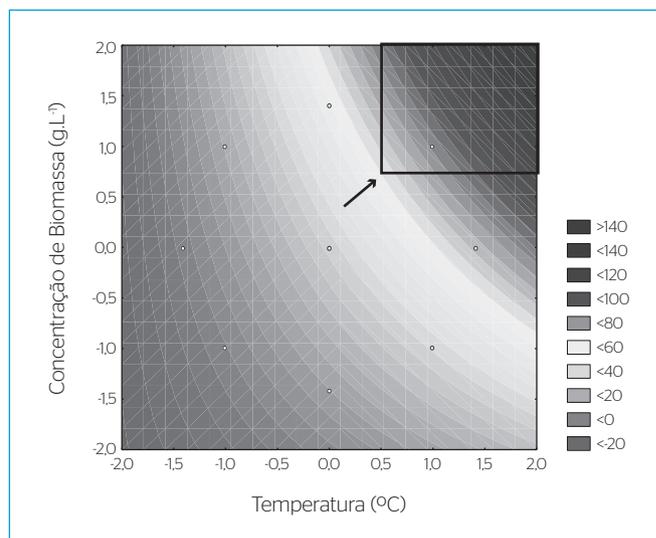


Figura 2 - Gráfico de curvas de níveis para os fatores concentração inicial de biomassa e temperatura em relação ao volume de biogás produzido.

modo, os valores dos resíduos diante da regressão não são significativos. O erro puro encontrado é praticamente desprezível. O valor da variação explicada é bastante alto diante da variação máxima explicável, que é de 97,17%. Todos os índices estatísticos mostram que o modelo ajustado descreve bem os resultados experimentais. As variáveis, que durante a triagem se mostraram pouco representativas diante da temperatura e concentração de biomassa, foram desprezadas.

Determinação da influência da adição de nutrientes na produção de biogás

Na Tabela 4 apresenta-se a matriz de planejamento que foi utilizada para o estudo da adição de nutrientes (sais de ferro, níquel e manganês) na produção de biogás, bem como seus níveis de concentração com suas respectivas respostas para um tempo de biodigestão de 72 horas. Os 17 experimentos elaborados correspondem a um planejamento estrela com triplicata do ponto central.

Na Tabela 5 apresentam-se os valores obtidos para os efeitos referentes à adição de nutrientes e seus respectivos índices estatísticos, em que se observa que alguns valores estimados para os efeitos

Tabela 3 - Análise de variância do modelo obtido.

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	Valor de F calculado	F tabelado
Regressão	7248,57	3	2416	22,77	4,35
Resíduos	742,768	7	106		
Falta de ajuste	515,248	5	103	0,91	19,30
Erro puro	227,520	2	114		
Total	7991,33				

Varição explicada: 90,71%. Varição máxima explicável: 97,17%.
F: distribuição de Fisher.

Tabela 4 - Matriz do planejamento estrela com triplicata no ponto central, com suas respectivas respostas.

FeSO ₄ ·7H ₂ O (mg.L ⁻¹)	NiSO ₄ ·6H ₂ O (mg.L ⁻¹)	MnSO ₄ ·xH ₂ O (mg.L ⁻¹)	Volume de gás produzido (mL)
-1 (18)	-1 (1,1)	-1 (1,8)	128,00
1 (42)	-1 (1,1)	-1 (1,8)	94,40
-1 (18)	1 (2,5)	-1 (1,8)	72,00
1 (42)	1 (2,5)	-1 (1,8)	113,60
-1 (18)	-1 (1,1)	1 (4,2)	136,00
1 (42)	-1 (1,1)	1 (4,2)	121,60
-1 (18)	1 (2,5)	1 (4,2)	147,20
1 (42)	1 (2,5)	1 (4,2)	120,00
-1,68 (10)	0 (1,8)	0 (3,0)	143,00
1,68 (50)	0 (1,8)	0 (3,0)	85,80
0 (30)	-1,68 (0,5)	0 (3,0)	121,55
0 (30)	1,68 (3,0)	0 (3,0)	94,38
0 (30)	0 (1,8)	-1,68 (1,0)	47,19
0 (30)	0 (1,8)	1,68 (5,0)	48,62
0 (30)	0 (1,8)	0 (3,0)	81,50
0 (30)	0 (1,8)	0 (3,0)	80,08
0 (30)	0 (1,8)	0 (3,0)	67,20

Tabela 5 - Cálculo dos efeitos e respectivos índices estatísticos para adição de nutrientes.

	Efeito	Desvio padrão	Valor p	IC95%
Média	74,550	13,544	0,0002	44,371-104,729
(1L) Termo linear do sal de ferro	-19,010	12,729	0,1661	-47,371-9,351
Termo quadrático do sal de ferro	38,468	14,023	0,0207	7,223-69,713
(2L) Termo linear do sal de níquel	-10,677	12,728	0,4211	-39,038-17,684
Termo quadrático do sal de níquel	33,908	14,022	0,0361	2,663-65,153
(3L) Termo linear do sal de manganês	17,472	12,728	0,1998	-10,889-45,833
Termo quadrático do sal de manganês	-8,651	14,022	0,5510	-39,896-22,593

apresentam sinal contrário aos esperados, efeitos lineares dos sais de ferro e de níquel. Esperava-se que a adição dos nutrientes ocasionasse um aumento na produção de biogás, ou seja, o efeito do fator nutriente deveria ter um sinal positivo. Os sinais desses efeitos são, na maioria, negativos, significando que com o aumento da concentração de alguns nutrientes houve menor produtividade de biogás. Segundo Sharma e Singh (2001), os sais de níquel e ferro produzem melhores resultados quando usados isoladamente, obtendo em torno de 81 e 72% de eficiência de remoção de demanda química de oxigênio (DQO), respectivamente, de um efluente de destilaria para produção de etanol. Quando utilizados em conjunto, sendo o níquel em baixa concentração e o ferro na concentração mais alta, obteve-se 71% de eficiência. Quando em forma de coquetéis, mesma configuração deste trabalho, os resultados foram menores a 71% de eficiência, o que mostra que a combinação dos dois sais diminui a eficiência dos nutrientes no sistema de produção de biogás.

Segundo Feroso *et al.* (2009), o uso dos metais em biodigestores precisa ser dosado para manter o metabolismo e o crescimento microbiano. A dosagem precisa equilibrar a oferta de uma mínima quantidade de micronutrientes para apoiar uma atividade microbiana desejada ou com uma taxa de crescimento em nível máximo de fornecimento de micronutrientes. Acima dessa dosagem os metais podem ser inibitórios ou tóxicos.

Considerando os resultados obtidos na Tabela 5 e as observações de Sharma *et al.* (2001) e Feroso *et al.* (2009), especula-se que as faixas de concentração dos micronutrientes de ferro e níquel utilizadas neste estudo se encontrem acima da necessidade da biomassa. Contudo, ao se comparar os valores do volume de biogás produzido sem e com o emprego dos nutrientes, Tabelas 1 e 4, respectivamente, fica evidenciado que a produção de biogás é fortemente influenciada pelo coquetel dos sais adicionados, os quais, em sua maioria, aumentaram bastante a quantidade produzida. Assim, percebe-se que houve melhora significativa na produção de biogás pela adição dos nutrientes selecionados; entretanto, quando se avaliou a influência da concentração destes, verificou-se que uma maior quantidade prejudicou a produtividade, reforçando a hipótese de que as quantidades empregadas poderiam estar acima do limite ótimo.

O modelo ajustado (Equação 4) é adequado para previsão de perfis do volume de gás produzido, conforme mostrado na Figura 3, que apresenta as curvas de nível geradas pelo modelo quadrático.

A Figura 3A relaciona os fatores concentração de sal de ferro e de níquel, em que se verifica que o melhor rendimento para produção de biogás ocorre na região delimitada pela concentração de sulfato de ferro de 18 (-1) a 6 mg.L⁻¹ (-2) e a concentração de sulfato de níquel de 1,1 (-1) a 0,4 mg.L⁻¹ (-2). A Figura 3B relaciona os fatores concentração de sal de ferro e de manganês. Nesta, verifica-se que a faixa onde se tem maior produção de biogás está delimitada entre a concentração de sulfato de ferro 6 (-2) a 12 mg.L⁻¹ (-1,5) e a concentração de sulfato

de manganês de 2,1 (-0,5) a 4,8 mg.L⁻¹ (+2,0). A influência dos fatores concentração de sal de níquel e de manganês pode ser avaliada na Figura 3C, sendo observadas duas regiões onde se tem maior produção: a primeira região entre 0,4 (-2,0) a 1,45 mg.L⁻¹ (-1,5) de sal de níquel e de 0,6 (-2,0) a 4,8 mg.L⁻¹ (+2,0) de sal de manganês, e a segunda região entre 2,85 (+1,5) a 3,2 mg.L⁻¹ (+2,0) de sal de níquel e de 2,1 (-0,5) a 4,8 mg.L⁻¹ (+2,0) de sal de manganês. Uma análise do conjunto da Figura 3 demonstra que, possivelmente, trabalhou-se com concentrações de sais de ferro e níquel muito elevadas, acima da condição ótima para o melhor desenvolvimento dos microrganismos produtores de biogás.

Determinação da influência da adição de nutrientes no tempo de retenção hidráulica e no volume de biogás produzido

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados experimentais para o volume de biogás produzido em função do tempo de biodigestão para diferentes condições de concentração inicial de substrato e temperatura de fermentação, respectivamente. Analisando-se o comportamento dos resultados é possível concluir que a temperatura e a concentração influenciam nitidamente a produtividade de biogás e o TRH. Nos sistemas analisados observa-se que entre 10 e 50 horas o sistema atinge sua maior taxa de produção de biogás; após, tende-se a estabilizar, demonstrando novamente que os biodigestores, quando em temperaturas favoráveis e maiores concentrações iniciais de biomassa, tendem a maximizar a produção.

Souza *et al.* (2005) obtiveram resultados similares em um sistema de biodigestão anaeróbia para os efeitos do TRH, da temperatura e da agitação do substrato sobre a produção volumétrica de metano a partir de dejetos de suínos em fase de terminação. Uma diferença significativa foi observada na produção de biogás e na produção volumétrica de metano, devido à diminuição do TRH e ao aumento da temperatura. Os maiores valores de produção volumétrica de metano (1,40 L de CH₄ por L de volume útil do biodigestor por dia) foram observados no TRH de 10 dias, na temperatura de 40°C, nos biodigestores sem agitação do substrato.

A Figura 6 mostra a produção de biogás para os experimentos realizados fixando-se a concentração de FeSO₄×7H₂O em 18 e 42 mg.L⁻¹, respectivamente, variando as concentrações iniciais de NiSO₄×6H₂O e MnSO₄×4H₂O.

Na Figura 6 pode-se observar um considerável aumento no volume de biogás produzido (70 a 145 g.L⁻¹) pela adição dos nutrientes em relação aos resultados obtidos na Figura 4 (70 g.L⁻¹) para a concentração inicial de substrato de 500 g.L⁻¹. Também foi observada uma grande redução do TRH do sistema, indo de 70 a 80 horas para de 15 a 20 horas. Essa redução do TRH foi provocada pelo aumento da taxa de reação ocasionado pelo melhor desempenho dos microrganismos devido à adição dos nutrientes. A melhoria do sistema de biodigestão anaeróbia pela adição de nutrientes também foi observada por Zhang *et al.* (2007), que estudaram o conteúdo de nutrientes em um processo de

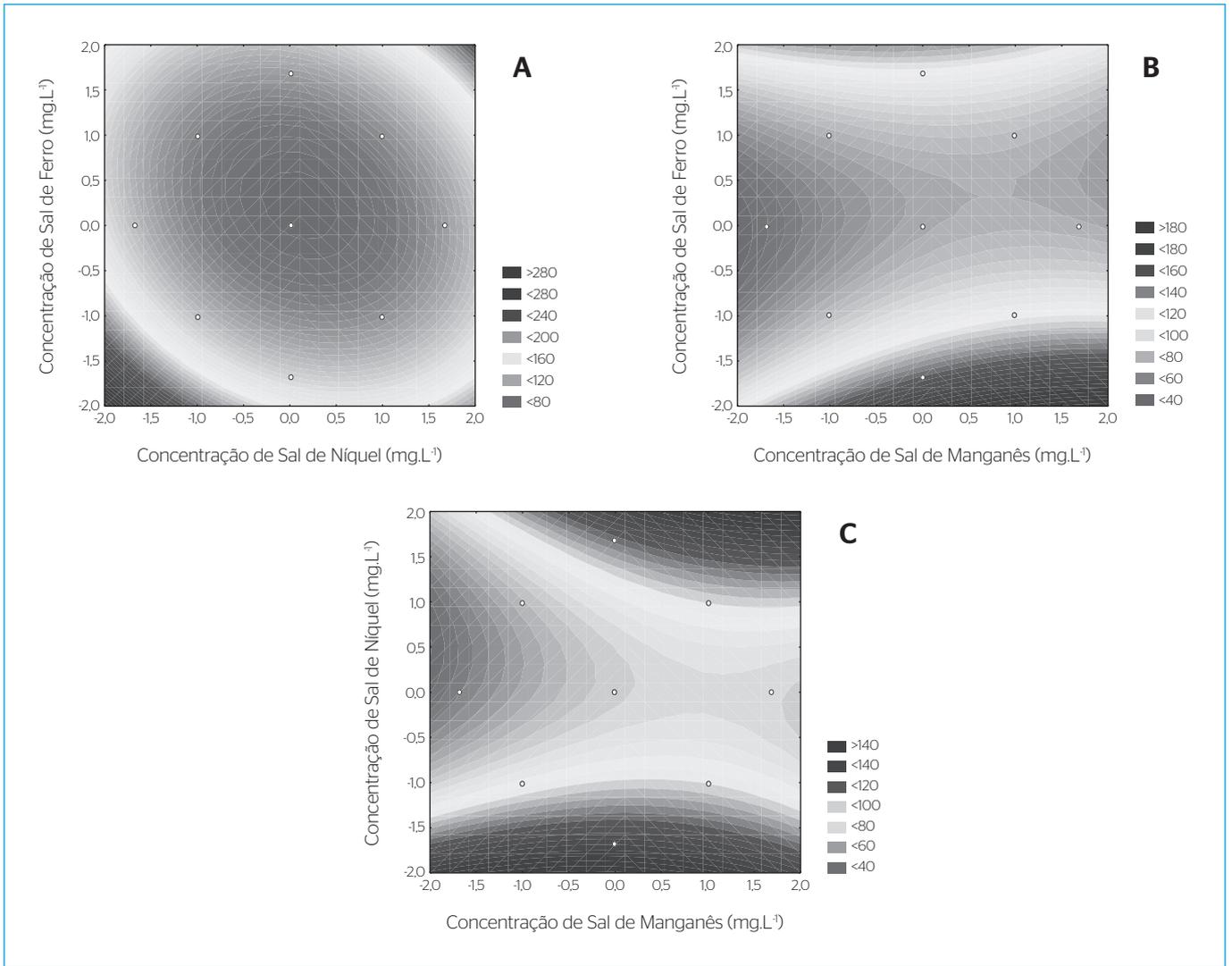


Figura 3 - Gráfico de curvas de níveis para os fatores concentração de sal de ferro e de níquel em relação ao volume de biogás produzido (A). Gráfico de curvas de níveis para os fatores concentração de sal de ferro e de manganês em relação ao volume de biogás produzido (B). Gráfico de curvas de níveis para os fatores concentração de sal de níquel e de manganês em relação ao volume de biogás produzido (C).

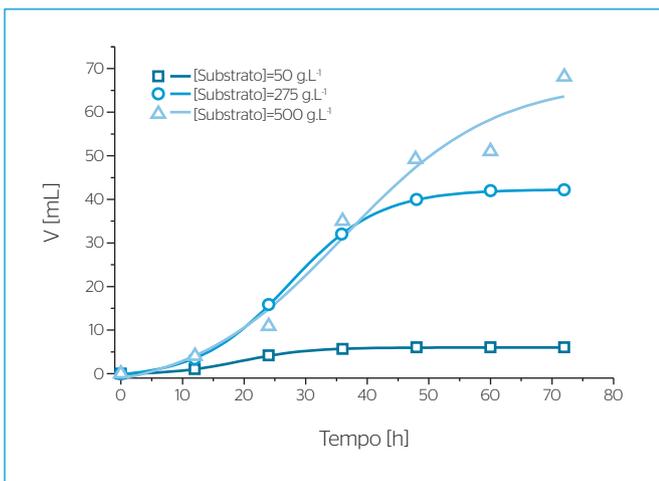


Figura 4 - Comportamento da produção de biogás para a temperatura de 30°C em diferentes concentrações iniciais de substrato.

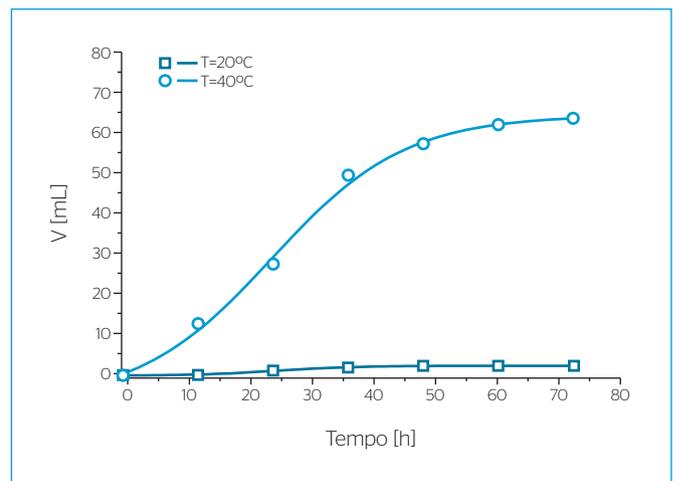


Figura 5 - Comportamento da produção de biogás para a concentração inicial de substrato 275 g.L⁻¹ em diferentes temperaturas de reação.

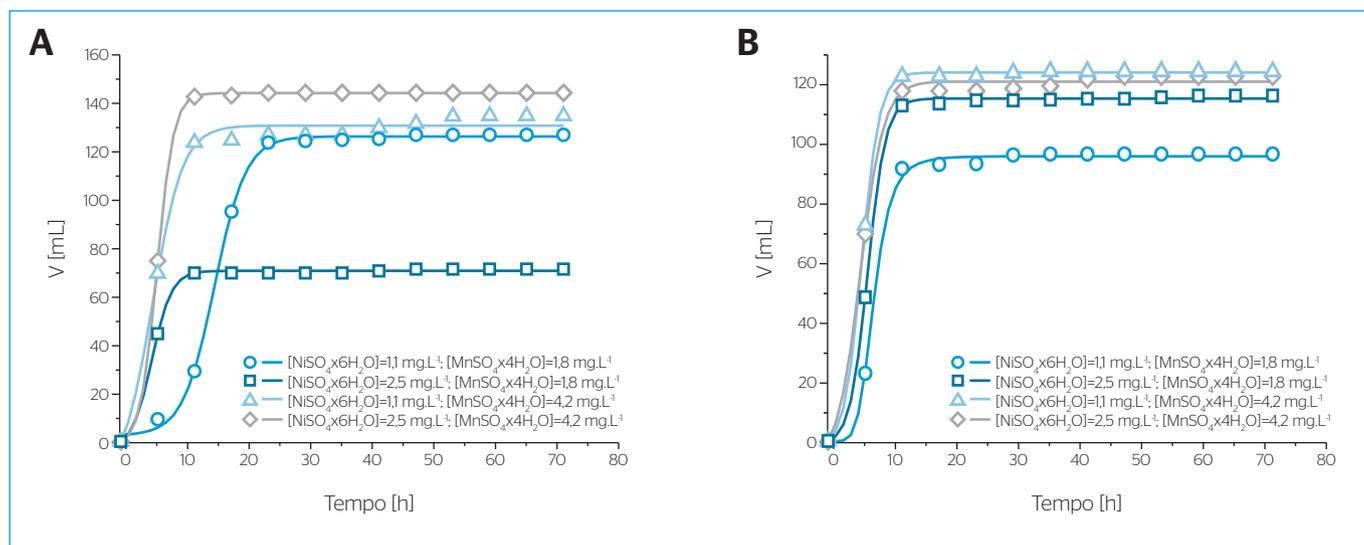


Figura 6 - Comportamento da produção de biogás para diferentes concentrações iniciais de NiSO₄·6H₂O e MnSO₄·4H₂O. (A) Concentração inicial de FeSO₄·7H₂O igual a 18 mg.L⁻¹. (B) Concentração inicial de FeSO₄·7H₂O igual a 42 mg.L⁻¹.

biodigestão anaeróbia que continha nutrientes em equilíbrio. A produção de metano foi de 348 e 435 mL.g⁻¹, respectivamente, após 10 e 28 dias de digestão. O teor médio de metano foi de 73%.

CONCLUSÕES

Com a técnica de planejamento experimental foram analisados cinco fatores de operação (temperatura, concentração inicial de biomassa e adição de três tipos de nutrientes), para melhor compreender o processo de biodigestão anaeróbia. Dentre eles, a temperatura e a concentração inicial dos dejetos foram os mais significativos (entre estes dois fatores, a temperatura foi mais significativa, considerando-se a quantidade de biogás produzido após 72 horas de operação). A otimização da temperatura e a concentração inicial de biomassa, pela metodologia da superfície de respostas, forneceram uma faixa ótima de trabalho que foi para a concentração de 395 a 595 g.L⁻¹ (níveis 0,75 a 2,0) e temperatura de 33,5 a 44°C (níveis 0,5 a 2,0). Também foi possível observar que existe forte interação entre os parâmetros temperatura e concentração

inicial de matéria orgânica, sugerindo que a combinação destes favorece um efeito sinérgico, o que potencializa a produtividade do biogás.

A adição de nutrientes no sistema de produção de biogás proporcionou uma redução significativa do TRH e também houve maior rendimento de biogás. Contudo, nas condições estudadas não foi possível obter um modelo empírico para fins de predição de valores de quantidade de volume de biogás produzido com variações nos teores de nutrientes utilizados.

A aplicação da metodologia de superfície de resposta permitiu avaliar de forma adequada um problema de inúmeras variáveis (temperatura, concentração de substrato e concentração de nutrientes), possibilitando visualizar o efeito destas de forma individual e correlacionada na produtividade de biogás. Considerando que são produzidos cada vez mais dejetos e de modo concentrado, pelo modelo de produção adotado, é importante identificar variáveis que potencializem a produção de biogás e em menor tempo, pois, assim, é possível implantar sistemas mais eficientes e ágeis para a digestão desses resíduos, o que contribuiria para a diminuição da contaminação do solo pela dispersão de resíduos ainda não tratados.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004) NBR 10004:2004 Classificação dos resíduos sólidos. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/m5.asp?cod_noticia=30ecod>. Acesso em: 20 nov. 2011.

ANGONESE, A.R.; CAMPOS, A.T.; WELTER, R.A. (2007) Potencial de redução de emissão de equivalente de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor. *Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, n. 3, p. 648-657.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. (1996) *Planejamento experimental e otimização de experimentos*. 2. ed. Campinas: Ed. Unicamp. 299 p.

BELLI FILHO, P.; CASTILHOS, A.B.; COSTA, R.H.R.; SOARES, S.R.; PERDOMO, C.C. (2001) Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 166-170.

- BELLI FILHO, P.; DA SILVA, G.P.; SANTO, C.L.; LISBOA, H.M.; DO CARMO JUNIOR, G.N. (2007) Avaliação de impactos de odores em bacias hidrográficas com produções de suínos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 252-258.
- BRASIL. (2010) Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 23 nov. 2011.
- DIESEL, R.; MIRANDA, C.R.; PERDOMO, C.C. Coletânea de Tecnologias sobre Dejetos de Suínos. BIPERGS (2002). Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br>>. Acesso em: 05 fev. 2010.
- DINUCCIO, E.; BALSARI, P.; GIOELLI, F.; MENARDO, S. (2010) Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 10, p. 3780-3783.
- DONG, L.; ZHENHONG, Y.; YONGMING, S. (2010) Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW). *Bioresource Technology*, v. 101, n. 8, p. 2722-2728.
- DUMAS, C.; PEREZ, S.; PAUL, E.; LEFEBVRE X. (2010) Combined thermophilic aerobic process and conventional anaerobic digestion: Effect on sludge biodegradation and methane production. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 8, p. 2629-2636.
- ESPERANCINI, M.S.T.; COLEN, F.; BUENO, O. DE C.; PIMENTEL, A.E.B.; SIMON, E.J. (2007) Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 1, p. 110-118.
- FARHAD, S.; YOO, Y.; HAMDULLAHPUR, F. (2010) Effects of fuel processing methods on industrial scale biogas-fuelled solid oxide fuel cell system for operating in wastewater treatment plants. *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 5, p. 1446-1453.
- FERMOSO, A.F.G.; BARTACEKA, J.; JANSENC, S.; LENSEA, P.N.L. (2009) Metal supplementation to UASB bioreactors: from cell-metal interactions to full-scale application. *Science of the Total Environment*, v. 407, n. 12, p. 3652-3667.
- HOFFMANN, G.; SCHINGNITZ, D.; SCHNAPKE, A.; BILITEWSKI, B. (2010) Reduction of CO₂-emissions by using biomass in combustion and digestion plants. *Waste Management*, v. 30, n. 5, p. 893-901.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da pecuária mundial. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 21 set. 2009.
- KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMET, R.L.R. (2009) Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 22, p. 5485-5489.
- OMETTO, A.R.; RAMOS, P.A.R.; LOMBARDI, G. (2007) The benefits of a Brazilian agro-industrial symbiosis system and the strategies to make it happen. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, n. 13-14, p. 1253-1258.
- SÁNCHEZ, E.; BORJA, R.; WEILAND, P.; TRAVIESO, L.; MARTÍN, A. (2001) Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. *Process Biochemistry*, v. 37, n. 5, p. 483-489.
- SHARMA, J. & SINGH, R. (2001) Effect of nutrients supplementation on anaerobic sludge development and activity for treating distillery effluent. *Bioresource Technology*, v. 79, n. 2, p. 203-206.
- SOUZA, F.C.; LUCAS JUNIOR, J.; FERREIRA, W.P.M. (2005) Biodigestão anaeróbia de dejetos suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato - considerações sobre a partida. *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 2, p. 530-539.
- TEGHAMMAR, A.; YNGVESSON, J.; LUNDIN, M.; TAHERZADEH, M.J.; HORVÁTH, I.S. (2010) Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 4, p. 1206-1212.
- ZHANG, R.; EL-MASHAD, H.M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. (2007) Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 4, p. 929-935.