



Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás

Ozair Souza^{1,2}, Mauri Federizzi², Bruna Coelho¹, Theodoro M. Wagner¹ & Elisabeth Wisbeck^{1,2}

RESUMO

Propôs-se, neste trabalho, avaliar a potencialidade do uso de resíduos lignocelulósicos da bananicultura como substrato de fermentação do processo de metanização. Os resíduos casca de banana, engaço, folhas e pseudocaule da bananeira *Musa cavendishii*, foram biodegradados a 30 °C e pH 7,2, em diferentes volumes de trabalho, empregando-se como biodigestor frascos Erlenmeyer, garrafas plásticas e biorreator de bancada. A composição ideal do substrato para a metanização foi definida como: 50% m m⁻¹ de cascas, 25% de folhas e 25% de pseudocaule. O engaço, por apresentar baixa velocidade de biodegradação em comparação com as demais biomassas, não foi recomendado para a metanização conjunta dos resíduos. A hidrólise ácida prévia do substrato foi prejudicial à produção de biogás visto que, além de conduzir à formação de H₂S no biogás gerado, inibiu a formação de CH₄. O rendimento máximo em biogás, obtido em biodigestor de bancada empregando-se substrato in natura, foi de 244 L_{CNTp} kg⁻¹ST com 66,8% v v⁻¹ de CH₄.

Palavras-chave: metanização, biodigestão anaeróbia, gás metano

Biodegradation of lignocellulosics residues generated in banana cultivation and its valorization for the production of biogas

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the capability of using lignocellulosic residues from banana cultivation as a fermentation substrate of the methanization process. The following *Musa cavendishii* residues were evaluated: bananas peels, stalk, leaves and the pseudostem. The fermentation studies were developed at 30 °C and pH 7.2 with different working volumes in Erlenmeyers flasks, plastic bottles and bioreactor bench. The ideal composition of the methanization substrate was set containing: 50% (w/w) of peels, 25% of leaves and 25% of pseudostem. The stalk, presenting a lower rate of biodegradation in comparison to other biomasses, was not recommended for the methanization together with such residues. The acid hydrolysis advance of the substrate was detrimental to the production of biogas. In addition to making possible the production of H₂S in biogas generated, it inhibited the formation of CH₄. The maximum yield of biogas, obtained in biodigestor bench of employing substrate in nature, was 244 L_{CNTp} kg⁻¹ST with 66.8% (v/v) of CH₄.

Key words: methanization, anaerobic digestion, methane gas

¹ DEQ/UNIVILLE, CP 246, CEP 89201-972, Joinville, SC. Fone: (47) 3461-9056. E-mail: osouza@univille.br, bruna.coelho@ibest.com.br, thewag@terra.com.br, ewisbeck@univille.br

² Mestrado em Engenharia de Processos/UNIVILLE. Fone: (47) 3461-9180. E-mail: mauriengambi@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A bananeira é uma das principais frutíferas em exploração no Brasil; entretanto, a quantidade de bananas produzidas anualmente no País só é superada pela de laranjas. A bananeira é cultivada, sem exceção, em todos os estados da Federação. Em 2005, o estado catarinense, segundo maior produtor nacional de bananas, produziu 668 mil toneladas da fruta, principalmente as das espécies *Musa sapientum* e *Musa cavendishii*, popularmente conhecidas na região como banana branca e banana nanica, respectivamente (CEPA, 2006).

Dados da EMBRAPA (2006) mostram que, de cada 100 kg de frutas colhidas em 2006, 46 kg não foram aproveitados. Além desse rejeito, a cultura da banana gera outros resíduos no campo provenientes da sua industrialização. De acordo com dados levantados em uma empresa de alimentos do município de Garuva, um dos maiores produtores de banana nanica na região nordeste do estado de Santa Catarina, para cada tonelada de banana industrializada aproximadamente 3 toneladas de pseudocaule, 160 kg de engaços, 480 kg de folhas e 440 kg de cascas são gerados.

O aproveitamento desses resíduos na produção de biogás, não só possibilitaria a redução da poluição ambiental mas permitiria agregar valor à cultura da banana, que tem enfrentado, nos últimos anos, grandes desafios gerados pela oscilação do seu preço no mercado nacional.

A composição do biogás, combustível resultante da biodegradação anaeróbia de matérias orgânicas, varia de acordo com as características do tipo de resíduo empregado como substrato de fermentação e as condições de operação do biodigestor. Os principais constituintes do biogás são o metano (60-80% v/v) e o dióxido de carbono (20-40% v/v); outros gases, como sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono, também podem compor o biogás, porém em menores concentrações.

De acordo com Salomon & Lora (2005), o poder calorífico do biogás é variável, sendo aproximadamente de 22500 a 25000 kJ m⁻³. Segundo Schalch & Moraes (1988), um metro cúbico de biogás possui equivalência energética a 0,80 kg de carvão vegetal, 1,5 kg de lenha, 0,55 L de óleo diesel 0,45 kg de GLP e 1,43 kWh em energia elétrica.

O processo contínuo de produção de biogás já é bem conhecido, em especial a geração de gás metano a partir de esgotos sanitários e de dejetos de animais. Recentemente, pesquisadores se têm voltado para o uso de resíduos agrícolas como biomassa na geração do biogás.

Lastella et al. (2002), empregaram rejeitos hortifrutí de supermercados como substrato e produziram, em média, 2067 L de biogás dia⁻¹, com produtividade de 51,6 L kg⁻¹ dia⁻¹. Bouallagui et al. (2003; 2004a; 2004b; 2005) utilizaram o mesmo tipo de biomassa e avaliaram o efeito do teor de sólidos totais, ST, no meio de fermentação e do tempo de retenção hidráulico, TR_H, sobre a produção de biogás. A maior velocidade de produção de biogás obtida pelos autores foi de 2,62 L L⁻¹ dia⁻¹ com rendimento em biogás de 594,96 L kg⁻¹ST e concentração de CH₄ de 55% v/v nas condições operacionais de ST = 6% m/m e TR_H = 12 dias.

Gomes et al. (2006), utilizando como substrato lixos orgânicos compostos de frutas e vegetais obtiveram um rendimento em biogás de até 0,8 L kg⁻¹ de sólidos voláteis.

Especificamente em relação aos rejeitos da bananicultura, tem-se os trabalhos de Deivanai & Kasturi Bai (1995), Bardiya et al. (1996) e Kalia et al. (2000), em que o primeiro grupo realizou a biometanização da banana in natura (rejeito) e alcançou o rendimento máximo de 9,22 L kg⁻¹ST. Bardiya et al. (1996) empregaram cascas da banana como substrato e produziram de 65 a 127 L CH₄ kg⁻¹ST enquanto Kalia et al. (2000), utilizaram o pseudocaule da bananeira *Musa indica* quimicamente tratado para a redução do teor de fibras e produziram biogás com rendimento de 271 L kg⁻¹ ST.

Devido à possibilidade da venda de créditos de carbono, a produção de biogás novamente ganha atenção e começa a ter destaque na cadeia produtiva. Conforme Salani (2007), o mercado de crédito de carbono surgiu a partir do Protocolo de Kyoto e gerou transações de 9,4 bilhões de euros, em 2005; ainda de acordo com o autor, o primeiro leilão de créditos de carbono realizado na América Latina foi concretizado em setembro de 2007, na Bolsa de Mercadorias e Futuros de São Paulo. O banco belgo-holandês Fortis comprou os 808,45 mil créditos ofertados a US\$ 16,20 cada um, com ágio de 27,6% sobre o preço mínimo proposto.

Com este contexto, o trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se avaliar a possibilidade do uso dos resíduos lignocelulósicos cascas de banana, engaço, pseudocaule e folhas de bananeiras como substrato de fermentação no processo de metanização.

MATERIAL E MÉTODOS

Biomassa: Os resíduos lignocelulósicos casca de banana, engaço, folhas e pseudocaule da bananeira *Musa cavendishii*, foram fornecidos por uma empresa agroindustrial da região nordeste de Santa Catarina. Esses resíduos foram cominuídos primeiramente em triturador industrial e em seguida em liquidificador doméstico de 2 L. Todo o processo de cominuição foi realizado em meio aquoso até a obtenção de uma massa fluida de baixa viscosidade contendo sólidos de tamanho médio abaixo de 3 mm (inspeção visual).

Ensaio de fermentação: Foram realizados quatorze ensaios de biodegradação, em três etapas distintas, conduzidos a 30 °C e pH 7,2. Como inóculo, empregou-se suspensão microbiana obtida de biodigestor em operação em granja de criação de suínos.

Na primeira etapa determinou-se as concentrações ideais de cada um dos resíduos no meio de biodegradação. A concentração máxima de cada um dos resíduos avaliados nesses ensaios, expressa em grama de sólidos totais por litro (g ST L⁻¹), foi função do volume de trabalho planejado (V_T) e do volume máximo de biomassa possível de ser triturada sem, contudo, ultrapassar o V_T após a sua cominuição. Esses valores foram de 27,0 g ST L⁻¹ para as cascas de banana, 16,7 g ST L⁻¹ para o engaço, 22,1 g ST L⁻¹ para as folhas e 8,5 g ST L⁻¹ para o pseudocaule. De acordo com a caracterização dos resíduos realizada por Conradi et al. (2006), referidos

valores corresponderam às seguintes concentrações de massa úmida (μ) de substrato no meio de fermentação: 237,6, 292,3, 137,0 e 182,0 g μ L⁻¹, respectivamente. A partir dessas concentrações, identificadas por 1:1, adicionou-se água de diluição para as proporções de 1:2 e 1:4, totalizando três diferentes concentrações para cada um dos substratos avaliados: Ensaios E1 (1:4, 1:2, 1:1), Ensaios E2 (1:4, 1:2, 1:1), Ensaios E3 (1:4, 1:2, 1:1) e Ensaios E4 (1:4, 1:2, 1:1). Cada um desses ensaios foi realizado em triplicata e conduzido em frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 100 mL de V_T . Como incubadora foi empregado o agitador orbital Certomat-HR com frequência de agitação de 100 min⁻¹.

Realizaram-se, na segunda etapa, dois ensaios de biodigestão da mistura de resíduos selecionada na etapa anterior com o objetivo de se avaliar os efeitos da hidrólise ácida da biomassa sobre a produção de biogás: Ensaio E5 – uso de biomassa in natura e Ensaios E6 – hidrólise prévia da biomassa. Conduziu-se os ensaios em garrafas plásticas de 1 L com $V_T = 500$ mL contendo, como substrato, aproximadamente 20 g ST L⁻¹ composto dos resíduos casca de banana, folhas e pseudocaule da bananeira com as concentrações de 50, 25 e 25% m m⁻¹, respectivamente. Estabeleceu-se a composição desta mistura a partir dos resultados obtidos na etapa anterior. Para a hidrólise ácida dos resíduos se empregou H₂SO₄ na concentração de 1,0% m m⁻¹, conforme indicado por Yadvika et al. (2004). O processo de hidrólise foi conduzido em autoclave a vapor a 120 °C durante 15 min. O volume de inóculo empregado foi de 10% do volume de trabalho.

Avaliaram-se, na última etapa, os ensaios de metanização da biomassa em biorreator New Brunswick, modelo SF-116 com dorna de 10 L e com sistema automático de controle de pH, temperatura e agitação (Ensaio 7). O V_T foi de 5 L e o volume de inóculo foi de 50% desse volume. A frequência de agitação foi de 130 min⁻¹ utilizando-se, como agitador, duas turbinas, cada uma com seis pás planas (flat-blade) de diâmetro 75 mm. A concentração inicial de substrato foi a mesma daquela empregada na segunda etapa. O tempo de retenção hidráulica foi de 35 dias.

Métodos analíticos: Retiraram-se, para as duas primeiras etapas dos ensaios, amostras no início de cada processo (após inoculação), com 15 dias de fermentação e no tempo final da fermentação; nessas etapas cada biodigestor (Erlenmeyer ou garrafa plástica) constitui uma amostra. Na etapa desenvolvida em biorreator New Brunswick as amostras foram retiradas a cada sete dias de processo. Realizaram-se as seguintes análises: (1) determinação das concentrações de ST através de análise gravimétrica empregando-se cadinhos de porcelana contendo, cada um, 5 mL de amostra úmida e tempo de secagem de 48 h a 105 °C; (2) determinação da DQO através de Kit DQO Reagente da Hach Company, na faixa de 0 a 1500 mgO₂ L⁻¹, código 21259, conforme metodologia fornecida pelo fabricante juntamente com o produto; (3) determinação do volume de biogás gerado no biorreator New Brunswick a partir da leitura da altura da coluna de água deslocada no interior de uma proveta de 2 L emborcada em uma bandeja também com água. Na parte superior da proveta foram feitos dois furos, aos quais se fixou um tubo de vidro para entrada do biogás além de um termômetro para leitura contínua da sua

temperatura. No tubo de vidro foi adaptado um conector em Y com um septo de vedação para retiradas periódicas de amostras do biogás produzido. Neste sistema o biogás do biodigestor foi conduzido através de tubo de silicone (5 mm de diâmetro interno) até a proveta e por meio da sua pressão manométrica exercida sobre a superfície de água, a coluna de líquido foi empurrada para fora da mesma, tornando possível a leitura direta do volume de biogás gerado. A partir do valor de temperatura do biogás contido na proveta e se considerando a mistura gasosa como gás ideal, foi convertido o volume de gás gerado por dia em volume de gás nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) e expresso na unidade L_{CNTP} dia⁻¹; (4) determinação da composição do biogás: a caracterização do biogás gerado foi realizada a partir das determinações das concentrações dos gases CH₄, CO₂ e H₂S em cromatógrafo a gás Agilent, série 6890, com mostrador automático série 7683, empregando-se coluna HP-PLOT Q da Agilent (Port n. 19091P-Q04) com 30 m de comprimento, diâmetro 0,32 mm e filme de espessura 20 μ m. Usou-se, como amostra, uma única coleta do biogás para cada tempo de fermentação avaliado. O biogás foi coletado em ampola de vidro de 300 mL com tampa roscada e vials numa extremidade e, na outra, uma torneira esmerilhada para entrada da amostra. Antes da coleta da amostra, a ampola de vidro foi lavada com ar atmosférico para se retirar possíveis impurezas, com o auxílio de uma bomba a vácuo; em seguida foi fechada a ampola com vácuo e coletado 300 mL de biogás no sistema de proveta acoplada ao biodigestor. A injeção da amostra no forno do cromatógrafo (1 mL) foi realizada manualmente através de seringa Hamilton Pat. eb. 315080 com êmbolo de teflon e capacidade volumétrica de 5,0 mL. Entre cada amostra injetada foi realizada a limpeza da seringa através de repetidas sucções de ar ambiente; no forno, a amostra foi, inicialmente, aquecida a 45 °C e, em seguida, elevada para 90 °C (velocidade média de aquecimento de 25 °C min⁻¹), 240 °C (15 °C min⁻¹) e 260 °C (10 °C min⁻¹), permanecendo 2 minutos em cada uma dessas temperaturas até ser conduzida ao detector. Utilizou-se o detector de condutividade térmica (TCD) com temperatura de 250 °C e vazão de referência He a 20 mL min⁻¹ e N₂ (makeup) a 7,0 mL min⁻¹. Como gás de arraste foi empregado o gás He com vazão constante de 2,2 mL min⁻¹ e, como padrão, uma mistura primária dos gases analisados contendo (em porcentagem volumétrica) 40,030% de CH₄, 29,950% de CO₂ e 30,020% de H₂S, fornecido pela empresa White Martin, Joinville-SC.

Os dados foram submetidos à análise de variância dos valores médios das amostras, através do Teste de Tukey com nível de significância de 5% (ANOVA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 se encontram os resultados obtidos nos ensaios E1 a E4 empregando-se, de forma isolada, cada um dos resíduos avaliados.

Conforme a Tabela 1, após 15 dias de processo, os ensaios E1-1:2 e E1-1:1 apresentaram respectiva redução média da DQO de 41,6 e 62,7%, em relação aos seus valores iniciais.

Tabela 1. Valores de ST e DQO obtidos na biodigestão dos resíduos cascas de bananas (E1), engaço (E2), folhas (E3) e pseudocaule de bananeiras (E4), empregando-se diferentes concentrações de substrato (1:1, 1:2 e 1:4)

Ensaio	ST (g ST L ⁻¹)			DQO (g DQO L ⁻¹)		
	Tempo de processo (t = dias)			Tempo de processo (t = dias)		
	0 a*	15 b*	30 c*	0 d*	15 e*	30 f*
E1-1:4	8,8±1,0 b	7,4±0,3 a	5,2±0,0	8,0±2,1 e	5,3±0,6 d	0
E1-1:2	14,0±0,0	7,7±0,2	7,2±0,2	12,5±1,0	7,3±0,6	0
E1-1:1	27,0±0,2	21,9±0,0	12,7±0,1	24,7±2,5	9,2±3,5	0
E2-1:4	4,9±0,7 bc	4,5±0,1 a	5,4±0,1 a	4,8±1,8 ef	3,4±1,6 df	3,0±0,9 de
E2-1:2	8,9±1,4	6,7±0,0	7,3±0,2	**	2,6±0,9 f	2,6±1,2 e
E2-1:1	16,7±2,3	10,8±0,9	9,5±0,5	6,3±0,7	4,4±0,8 f	3,7±0,8 e
E3-1:4	8,6±0,5	5,1±0,2 c	5,4±0,1 b	5,3±0,9	1,1±0,4	0
E3-1:2	10,8±0,1	8,4±0,2 c	8,0±0,8 b	8,0±1,0	1,7±0,5	0
E3-1:1	22,1±0,1	17,5±0,2 c	18,1±0,4 b	9,7±0,9	3,2±1,1	0
E4-1:4	4,2±0,4	2,8±0,1	**	2,6±0,7	0	**
E4-1:2	5,2±0,1	3,8±0,3	**	4,0±0,2	0	**
E4-1:1	8,5±0,5	6,5±0,2	**	7,0±0,2	0	**

*Letras iguais às letras de cada t (0, 15 e 30 dias), específicas a ST ou DQO, demonstram médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5%; ** não determinado.

Neste período, não houve diferença significativa entre os valores da DQO para o ensaio E1-1:4, demonstrando assim uma diluição excessiva do substrato em relação aos ensaios 1:2 e 1:1. Nas condições experimentadas, a concentração de 27,0 g ST L⁻¹ (E1-1:1) indicou maior potencial de degradação sendo considerada, portanto, como boa indicativa da concentração ideal para a continuidade dos trabalhos. Desconsiderando-se a contribuição do inóculo nesse valor, a concentração de ST relativa somente ao substrato foi de 23,8 g ST L⁻¹.

Com relação às folhas esses valores de porcentagem de redução da DQO relativos a cada concentração de substrato empregada, foram de 79,2% (Ensaio E3-1:4), 78,7% (Ensaio E3-1:2) e 67,0% (Ensaio E3-1:1). Os respectivos valores iniciais de ST, devidos somente ao substrato (sem o inóculo), foram 3,3, 9,6 e 16,8 g ST L⁻¹ sendo, portanto, a concentração em torno de 3 g ST L⁻¹ a mais indicada para a biodegradação desse material.

Verifica-se, na Tabela 1, que o pseudocaule (Ensaio E4) foi totalmente biodegradado nos primeiros 15 dias de processo enquanto que para as cascas (Ensaio E1) e para as folhas (Ensaio E3) foi necessário um maior tempo de fermentação. Este fato pode ser explicado devido às características físicas de cada um dos substratos pois o pseudocaule possui, além de menor ST, valor inferior de DQO.

Quando o engaço foi utilizado como substrato (Ensaio E2), os ensaios 1:4 e 1:2 não apresentaram diferenças significativas de DQO para os tempos de fermentação avaliados. Apenas o ensaio 1:1, apresentou em torno de 30% de redução da DQO nos primeiros 15 dias de processo; entretanto não se observou, estatisticamente, continuidade desta biodegradação. O seu valor de velocidade média de redução da DQO (\bar{g} VDQO) relativo aos primeiros 15 dias de processo foi de 0,13 g DQO L⁻¹ dia⁻¹ para uma concentração inicial de 16,7 g ST L⁻¹. Comparativamente ao emprego das cascas de banana como substrato, numa mesma proporção (1:1), com uma DQO de 1,03 g DQO L⁻¹ dia⁻¹, o valor de DQO do engaço

foi de aproximadamente oito vezes menor e, em relação às folhas da bananeira, (DQO = 0,43 g DQO L⁻¹ dia⁻¹) e ao pseudocaule (DQO = 0,47 g DQO L⁻¹ dia⁻¹) esta diferença foi da ordem de 3,5 vezes menor. Este baixo valor em DQO do engaço, sobretudo se comparado com o DQO do pseudocaule não era esperado. De acordo com estudos já realizados (Conradi et al., 2006), notou-se que o engaço possui propriedades físicas e químicas superiores às do pseudocaule para a biodigestão. Os autores concluíram, ainda, que entre os quatro tipos de resíduo apenas o pseudocaule, e não o engaço, merecia maior estudo para o seu emprego como substrato na biodigestão. Apesar desta discrepância, o engaço foi descartado para a continuidade dos estudos pois, em função da baixa quantidade do resíduo gerado no campo, comparativamente com os outros três substratos, não justificaria, neste momento, novos estudos para a elucidação das dúvidas aqui geradas.

Em função dos resultados observados nesses ensaios e se considerando que na instalação futura de um biodigestor industrial, deve-se procurar empregar, de forma conjunta, todos os resíduos biodegradáveis (visando a uma praticidade maior na operação do sistema) recomenda-se uma carga inicial do biodigestor composta de (em massa úmida) 50% de cascas, 25% de folhas e 25% de pseudocaule, com tempo de retenção de 15 a 30 dias.

Em relação à concentração ideal de sólidos totais no meio de fermentação, novos estudos precisam ainda ser realizados para a sua otimização, principalmente se for pretendido o uso de um sistema contínuo de biodigestão. Segundo Zennaki et al. (1996), nesse tipo de sistema a faixa ideal de operação é de 70 a 90 g ST L⁻¹, ou seja, 4 vezes maior que a aqui planejado (cerca de 20 g ST L⁻¹). Convém enfatizar que os autores empregaram dejetos de gado em seu trabalho e não resíduos vegetais; já Bouallagui et al. (2003), que empregaram refugos hortifruti de supermercado como substrato, recomendaram o emprego de 60 g ST L⁻¹. Em ambos os casos, acima de 100 g ST L⁻¹ a produção de biogás foi inibida.

Visando avaliar a contribuição da hidrólise ácida dos substratos sobre a produção de biogás, dois ensaios de metanização foram realizados com a mistura dos resíduos, já definida. No Ensaio E5 a mistura foi empregada in natura, sem pré-tratamento ácido e, no Ensaio E6, o substrato foi previamente submetido a hidrólise com H₂SO₄ 1%. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

De acordo com a Tabela 2, é conveniente destacar que, em comparação com o substrato in natura (Ensaio E5) o uso da hidrólise prejudicou o processo de produção de biogás. O

Tabela 2. Valores médios de produção de biogás (% v/v) com substrato in natura composto de 50% de casca de banana, 25% de folhas e 25% de pseudocaule de bananeiras (Ensaio E5) e com substrato previamente hidrolisado (Ensaio E6)

Parâmetro	Tempo de processo (dias)					
	0	7	14	21	28	35
CH ₄ (E5/E6)	0/0	0,3/0	6,0/0	26,0/0	25,4/0	22,9/0
CO ₂ (E5/E6)	0/0	99,5/100,0	93,9/100,0	74,0/95,7	74,6/96,4	77,1/97,1
H ₂ S (E5/E6)	0/0	0/0	0/0	0,0/4,28	0,0/3,6	0,0/2,8

objetivo maior desse tipo de processo é obter alto rendimento em biogás e alta concentração de CH₄ no biogás gerado; além de não ter sido detectada a formação de CH₄ no biogás gerado, a hidrólise ácida conduziu à formação de H₂S (Ensaio E6).

A produção de H₂S a partir do substrato hidrolisado pode ser explicada pelo fato de que a hidrólise, ao ser realizada com ácido sulfúrico com posterior correção do pH do meio de fermentação com hidróxido de sódio, possibilitou a formação de sulfato de sódio. Segundo Janssen et al. (1999), alguns grupos de bactérias que usam o catabolismo oxidativo podem utilizar o sulfato de sódio como fonte inorgânica de energia e o reduzem a H₂S. De acordo com Foresti (1994), a redução biológica de sulfato em digestores anaeróbios é, em geral, considerada como um processo indesejável, por duas razões: o sulfato oxida material orgânico que deixa de ser transformado em metano e no processo se forma o gás sulfídrico, que é corrosivo e confere odor muito desagradável tanto à fase líquida como ao biogás, além de poder ser tóxico para o processo de metanogênese.

A metanização da mistura dos resíduos *in natura* em biorreator de bancada, utilizando inóculo na concentração de 50% do V_T e ST inicial de 29,5 g ST L⁻¹, propiciou maior controle do processo e conduziu a uma velocidade maior de produção de biogás. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos neste ensaio (Ensaio E7).

Durante os 35 dias de processo a produção acumulada de biogás foi de aproximadamente 36 L_{CNTP}, resultando no rendimento médio de 244 L_{CNTP} kg⁻¹ST; entretanto, pode-se observar, na Tabela 3, que a proporção de CH₄ no biogás gerado no início do processo foi bem menor que a esperada (50-80%). Somente após 21 dias de processo a produção de metano atingiu esta faixa de valores, coincidindo com o tempo em que o valor de DQO apresentou diferença significativa aos tempos anteriores (14, 7 e 0 dias). Este comportamento é típico de tal tipo de processo, uma vez que o inóculo procedente de biodigestor em operação com dejetos de suínos necessita de alguns dias para adaptação com o novo tipo de substrato.

Este valor foi maior que o observado por Deivanai & Katuri Bai (1995) e por Kalia et al. (2000), que empregaram, como substrato de fermentação, pseudocaule; os autores alcançaram valores de rendimento da ordem de 9 L kg⁻¹ST com 30 dias de metanização e de 229 L kg⁻¹ST com 57 dias, respectivamente; no primeiro caso foi utilizado o substrato *in natura*

e, no segundo, substrato com pré-tratamento químico para quebra das fibras existentes no material.

Utilizando resíduos sólidos vegetais advindos de central de abastecimento e feira livre, resultando em uma carga orgânica de 600 kg de substrato m⁻³ (120 kg ST m⁻³), Leite et al. (2003) obtiveram, após 240 dias de fermentação, uma produção acumulada de 1200 L de biogás contendo, em média, 60% (percentagem em volume) de gás metano. Considerando o volume de trabalho do biorreator empregado pelos autores (2200 L), esta produção conduziu ao rendimento em biogás de 18,3 L_{CNTP} kg⁻¹ST. Esse rendimento é da ordem de 65,6% menor que o obtido neste trabalho (244 L_{CNTP} kg⁻¹ST). Essa diferença percentual pode ser explicada pelos diferentes tipos de inóculo empregados e pelos diferentes tipos de substratos utilizados. Enquanto Leite e colaboradores utilizaram lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários como inóculo e mistura de diferentes tipos de frutas e vegetais como substrato, neste trabalho empregou-se como inóculo suspensões microbianas obtidas de biodigestores em operação e como substrato, resíduos vegetais da bananicultura.

O rendimento obtido neste trabalho denota a potencialidade do uso dos resíduos casca de bananas, folhas e pseudocaule como substrato de fermentação na geração de biogás. Tendo em vista tanto a capacidade calorífica do biogás (5000 kcal kg⁻¹) em relação à lenha com 40% de umidade (2400 kcal kg⁻¹), como o custo médio de obtenção de ambos (R\$ 0,65 kg⁻¹ e R\$ 0,35 kg⁻¹, respectivamente), verifica-se que a produção de biogás a partir desses resíduos passa a ser viável economicamente a partir do uso de biodigestores com capacidade mínima de geração diária de 10 m³ de biogás. A construção de um biodigestor tipo indiano que necessita, basicamente, apenas de cimento, areia e tijolo, com capacidade volumétrica de 50 m³ de volume, tem custo aproximado de R\$ 8.000,00. Tomando-se como base de cálculo um rendimento mínimo de biogás de 15 L kg⁻¹ST pode-se gerar até 3650 m³ de biogás por ano; este valor, em termos econômicos, equivale a aproximadamente R\$ 4.500,00, tornando o retorno do investimento original em torno de 3 anos do início de operação.

Nesta análise não se considerou o provável ganho financeiro advindo dos créditos de carbono que podem ser comercializados nas Bolsas de Valores desde que se possuam as certificações RCEs (Reduções Certificadas de Emissões emitidas pelo Conselho Executivo do MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo com aprovação da ONU – Organização das Nações Unidas) ou na sigla em inglês CERs.

Tabela 3. Valores médios ± desvio padrão de DQO e valores médios de volume (V_g) e composição (CH₄, CO₂ e H₂S) do biogás gerado em função do tempo de biodigestão dos resíduos *in natura* em biorreator de bancada (Ensaio E7)

Parâmetro	Tempo de processo (dias)					
	0 a*	7 b*	14 c*	21 d*	28 e*	35 f*
DQO (g DQO L ⁻¹)	25,2 ± 2,7 b	20,5 ± 1,6 ac	17,7 ± 2,6 b	11,6 ± 1,7 e	9,8 ± 0,7 d	3,8 ± 1,1
V _g (L _{CNTP} dia ⁻¹)	0	0,62	1,10	1,25	1,60	1,05
CH ₄ (%v/v)	0	38,38	32,09	59,37	65,52	66,83
CO ₂ (%v/v)	0	60,54	67,90	40,62	34,47	33,16
H ₂ S (%v/v)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

*Letras iguais às letras de cada t (0, 7, 14, 21, 28 e 35 dias), específicas a ST ou DQO, demonstram médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5%

CONCLUSÕES

1. O engaço in natura não possui potencial para uso como substrato de fermentação na geração de biogás; os demais resíduos (casca de banana, folhas e pseudocaule) foram empregados com sucesso na produção de biogás alcançando o rendimento médio de 244 L_{CNTP} kg⁻¹ST quando utilizados de forma conjunta.

2. A composição ideal do substrato para a metanização empregando-se conjuntamente os resíduos da bananicultura, foi definida como (em massa úmida): 50% m/m de casca, 25% m/m de pseudocaule e 25% m/m de folhas.

3. O tratamento prévio do substrato através da hidrólise ácida com H₂SO₄ conduziu à formação de H₂S no biogás, gás malcheiroso e altamente corrosivo e inibiu a produção de CH₄.

4. O processo mostrou ter viabilidade tanto técnica como econômica. O retorno do investimento na construção e operação de um biodigestor tipo indiano com capacidade mínima de geração diária de 10 m³ de biogás, é de 3 anos.

LITERATURA CITADA

- Bardiya, N.; Somayaji, D.; Khanna, S. Biomethanation of banana peel and pineapple waste. *Bioresource Technology*, v.58, p.73-76, 1996.
- Bouallagui, H.; Cheikh, R. B.; Marouani, L.; Hamdi, M. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, v.86, p.85-89, 2003.
- Bouallagui, H.; Haouari, O.; Touhami, Y.; Cheikh, R. B.; Marouani, L.; Hamdi, M. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*, v.39, p.2143-2148, 2004a.
- Bouallagui, H.; Torrijos, M.; Godon, J. J.; Moletta, R.; Ben Cheikh, R.; Touhami, Y.; Delgenes, J. P.; Hamdi, M. Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Bioreactors performance. *Biochemical Engineering Journal*, v.21, p.193-197, 2004b.
- Bouallagui, H.; Touhami, Y.; Bem Cheikh, R.; Hamdi, M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, v.40, p.989-995, 2005.
- CEPA – Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola, Epagri, Governo do Estado de Santa Catarina. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina, 2005-2006. http://www.cepa.epagri.sc.gov.br/Publicacoes/sintese_2006/banana_2006.pdf, 7 Jun. 2007.
- Conradi, V.; Reeck, S. C.; Souza, O.; Wisbeck, E. Determinação das propriedades físicas e químicas dos resíduos gerados na industrialização da banana visando a produção de biogás. *Caderno de Iniciação à Pesquisa/UNIVILLE*, v.8, p.760-764, 2006.
- Deivanai. K.; Kasturi Bai, R. Batch biomethanation of banana trash and coir pith. *Bioresource Technology*, v.52, p.93-94, 1995.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa fruta. http://www.jornalentreposto.com.br/antiores/janeiro_2006/transporte.htm>17k, 28 Jun. 2008.
- Foresti, E. Fundamento do processo de digestão anaeróbia. In. *Seminário Latinoamericano: Tratamento Anaerobio de Águas Residuales 3*, Montevideo, Anais... p. 97-110, 1994.
- Gomes, X.; Cuetos, M. J.; Cara, J.; Morán, A.; García, A. I. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*, v.31, p.2017-2024, 2006.
- Janssen, A.; Marcelis, C.; Buisman, C. Industrial applications of new sulphur biotechnology. *Waste*, v.21, p.55-57, 1999.
- Kalia, V. C.; Sonakya, V.; Raizada, N. Anaerobic digestion of banana stem waste. *Bioresource Technology*, v.72, p.191-193, 2000.
- Lastella, G.; Testa, C.; Cornacchia, G.; Notornicola, M.; Voltasio, F.; Sharma, V. K. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. *Energy Conversion and Management*, v.43, p.63-75, 2002.
- Leite, V. D.; Sousa, J. T.; Prasad, S.; Lopes, W. S.; Athayde Júnior, G. B.; Dantas, A. M. M. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbio de batelada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.318-322, 2003.
- Salomon, K. R.; Lora, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. *Biomassa & Energia*, v.2, n.1, p.57-67, 2005.
- Salani, F. São Paulo ganha R\$ 34 milhões com crédito de carbono. *Jornal Folha de São Paulo*. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u331829.shtml>, 20 Set. 2007.
- Schalch, V.; Moraes, A. J. Biogás: A energia vinda do lixo urbano e sua relação com a produção e característica do chorume. *Revista de Limpeza Pública*, p.21-30, 1988.
- Yadvika, S.; Sreekrishnan, T. R.; Kohli, S.; Rana, V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques -a review. *Bioresource Technology*, v.95, p.1-10, 2004.
- Zennaki, B. Z.; Zadi, A.; Lamini, H.; Aubinear, M.; Boulif, M. Methane fermentation of cattle manure: effects of HRT, temperature and substrate concentration. *Tropicalicultura* v.14, 4, p.134-140, 1996.