

# Digestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros: efeito da dieta e da adição de caldo de cana-de-açúcar

Xavier, C.A.N.<sup>1</sup>®; Santos, T.M.B.<sup>2</sup> e Lucas Júnior, J.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência Animal. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Brasil.

<sup>2</sup>Departamento de Zootecnia. Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul. Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Rural. Universidade Estadual Paulista. Brasil.

## RESUMO

Objetivou-se avaliar o processo de digestão anaeróbia dos dejetos de vacas leiteiras alimentadas com diferentes volumosos em que alguns dejetos receberam caldo de cana-de-açúcar como aditivo. Os tratamentos avaliados nos biodigestores foram substratos que continham dejetos de vacas que receberam dietas contendo silagem de milho (substrato SM), que receberam cana-de-açúcar *in natura* (substrato CIN) ou que receberam cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem (substrato CHCV). Dejetos de animais que receberam cana-de-açúcar *in natura* ou cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem também foram avaliados com a adição de caldo de cana e denominados de substratos CINC e CHCVC, respectivamente. Nos dois últimos substratos, a inclusão de caldo de cana foi de 6% volume/volume. Foram utilizados 15 biodigestores batelada e cinco biodigestores semicontínuos, todos com volume útil de 10 L, mantidos a 30±2°C. Os parâmetros avaliados foram pH, alcalinidade parcial, redução de sólidos voláteis (SV) e potenciais de produção de CH<sub>4</sub>. O valores de pH e alcalinidade indicaram que não houve risco de falência do processo de digestão anaeróbia. As reduções de SV nos biodigestores batelada e semicontínuos foram de 51% em todos os substratos. Maiores potenciais de produção de CH<sub>4</sub> foram obtidos com o substrato CINC e CHCVC nos biodigestores batelada, média de 0,258 L CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>. Nos biodigestores semicontínuos, o maior potencial de produção de CH<sub>4</sub> foi do substrato CINC, de 0,226 L CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>. Nesses biodigestores, os substratos SM, CIN, CHCV, CHCVC renderam, em média, 0,171 L CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>. A adição de 6% de caldo de cana-de-açúcar contribuiu para o incremento da produção de CH<sub>4</sub> em até 24%.

## Anaerobic digestion of dairy cow manure: diet and sugar cane broth addition effect

### SUMMARY

The aim was to evaluate the anaerobic digestion process of the manure fed of dairy cattle on different roughages in which sugar cane broth was added to some manure as an additive. The treatments evaluated in the digesters were substrates containing manure from cows fed on maize silage (substrate MS), or manure from cows fed on fresh sugar cane (substrate FS) or manure from cows fed on quicklime hydrolyzed sugar cane (substrate HS). Manure from animals fed on fresh sugar cane or quicklime hydrolyzed sugar cane were also evaluated with sugar cane broth and aforementioned substrates FSJ and HSJ, respectively. In the two last substrates, the added amount of sugar cane broth was 6% on fresh matter basis (volume/volume). 15 batch process biodigesters and five semi-continuous biodigesters, all of them with a 10 L useful capacity, at 30±2°C. The parameters evaluated were pH, partial alkalinity, volatile solids (VS) removal and CH<sub>4</sub> yields. Alkalinity and pH values did not indicate risk of anaerobic digestion process failure. The VS removal was similar in the batch and semi-continuous digesters, 51% for every substrate. In batch digesters, higher CH<sub>4</sub> yields were obtained from substrates FSJ and HSJ, averaging 0,258 L CH<sub>4</sub> g VS<sup>-1</sup>. In semi-continuous digesters, the highest CH<sub>4</sub> yield was from substrate FSJ, 0,226 L CH<sub>4</sub> g VS<sup>-1</sup>. Similar CH<sub>4</sub> yield was obtained from substrates MS, FS, HS and HSJ in semi-continuous digesters, averaging 0,171 L CH<sub>4</sub> g VS<sup>-1</sup>. Sugar cane broth added to substrates (6%, volume/volume) incremented the CH<sub>4</sub> yield up to 24%.

## PALAVRAS CHAVE ADICIONAIS

Aditivo.  
Biodigestor batelada.  
Biodigestor semicontínuo.  
Metano.

## ADDITIONAL KEYWORDS

Additive.  
Batch digester.  
Semi-continuous digester.  
Methane.

## INFORMACIÓN

Cronología del artículo.  
Recibido/Received: 30.07.2015  
Aceptado/Accepted: 10.02.2016  
On-line: 11.06.2016  
Correspondencia a los autores/Contact e-mail:  
crisanx@yahoo.com.br

## INTRODUÇÃO

O processo de digestão anaeróbia desenvolvida em biodigestores é uma tecnologia antiga na qual a matéria orgânica diluída em água, ou substrato, é degradada por microrganismos na ausência de oxigênio, dando origem ao biogás e ao biofertilizante.

O biogás pode ser utilizado na substituição de fontes de energia, pois é composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) e o biofertilizante pode ser utilizado na substituição de fertilizantes comerciais, pois é rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio.

Entre as vantagens da digestão anaeróbia de dejetos animais estão: a redução da propagação de insetos e

microrganismos patogênicos; redução das emissões de gases causadores do efeito estufa e de partículas poluentes; redução das perdas de nutrientes para o solo com consequente contaminação das águas superficiais e subterrâneas e redução dos gastos com adubações e combustível fóssil (Otero *et al.*, 2011).

Porém, para a implantação de biodigestores, os custos são elevados e a utilização de substratos contendo apenas dejetos de bovinos podem não cobrir os custos do investimento (Castrillón *et al.*, 2013). Isso ocorre porque os dejetos de bovinos são mais ricos em material lignocelulósico de difícil degradação resultando em menor rendimento de metano comparado aos dejetos de suínos (Møller *et al.*, 2004; Amon *et al.*, 2007). Assim, o sistema deve ser otimizado para obtenção de maior quantidade de metano (CH<sub>4</sub>) por unidade de volume. Para isso, podem ser necessárias adições de elementos que incrementem as produções de CH<sub>4</sub>, sem riscos para o satisfatório desenvolvimento do processo. Tais suplementos, ou aditivos, podem ser orgânicos ou inorgânicos (Siddique *et al.*, 2014).

Os dejetos de vacas leiteiras têm composição muito variável em função da dieta, da época do ano, do estado fisiológico dos animais e da idade, por exemplo, sendo necessários estudos que quantifiquem a produção e composição do biogás gerado por esses dejetos segundo as dietas mais comuns nas granjas leiteiras.

No Brasil, por motivos econômicos, os produtores empregam alimentos alternativos na dieta dos animais, como a cana-de-açúcar em substituição à silagem de milho. A cana-de-açúcar apresenta algumas vantagens, dentre as quais, sua disponibilidade principalmente no período seco do ano, quando outras forrageiras são escassas (Oliveira *et al.*, 2012).

Já o caldo de cana-de-açúcar, rico em açúcares, principalmente em sacarose (Silva Neto *et al.*, 2014), adicionado ao substrato de biodigestores operados com dejetos de vacas leiteiras em lactação pode incrementar a produção de CH<sub>4</sub> pois contribui com carboidratos prontamente solúveis para o estabelecimento rápido e efetivo de comunidades microbianas típicas da digestão anaeróbia. Nesse contexto, os produtores que fornecem cana-de-açúcar como volumoso para os animais poderiam facilmente fornecer o caldo de cana para a digestão anaeróbia dos dejetos.

Objetivou-se avaliar o processo de digestão anaeróbia dos dejetos de vacas leiteiras alimentadas com diferentes volumosos em que alguns dejetos receberam caldo de cana-de-açúcar como aditivo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista localizada em Jaboticabal, São Paulo, Brasil. O clima da região é subtropical úmido, seco no

inverno e com chuvas no verão, temperatura média anual de 22,2 °C.

Um experimento foi realizado em biodigestores batelada e outro em biodigestores semicontínuos nos quais os delineamentos experimentais adotados foram o inteiramente casualizado (três repetições) e em blocos ao acaso (seis blocos), respectivamente, com cinco tratamentos. Os tratamentos avaliados nos biodigestores foram os substratos contendo ou não caldo de cana e dejetos produzidos por animais que receberam os diferentes volumosos.

Os diferentes substratos (**tabela I**) tanto para biodigestores batelada como para semicontínuos foram: dejetos de animais que receberam silagem de milho + água (substrato SM), dejetos de animais que receberam cana-de-açúcar *in natura* + água (substrato CIN), dejetos de animais que receberam cana-de-açúcar *in natura* + água + caldo de cana (substrato CINC), dejetos de animais que receberam cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem + água (substrato CHCV) e dejetos de animais que receberam cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem + água + caldo de cana (substrato CHCVC). A adição de caldo de cana foi realizada com base em experimentos prévios de 210 e 690 dias em biodigestores batelada e semicontínuos (Xavier e Lucas Júnior, 2009), respectivamente.

Os dejetos utilizados foram de vacas confinadas da raça Holandesa, em lactação, que receberam dietas com concentrado e diferentes volumosos por 90 dias. Os concentrados foram fornecidos conforme a massa corporal e a produção de leite dos animais. Os volumosos foram fornecidos à vontade permitindo sobras de até 10%. Os volumosos foram silagem de milho, cana-de-açúcar *in natura* e cana-de-açúcar hidrolisada com cal virgem. A cana-de-açúcar *in natura* (planta inteira) foi picada no momento do fornecimento. A cana-de-açúcar hidrolisada foi picada, misturada com 0,5% de CaO (massa/massa) diluído em água e fornecida no mínimo 12 horas depois e no máximo com 48 horas de armazenamento. Foi adotado um período de 15 dias de adaptação dos animais às dietas.

Foram utilizados 15 biodigestores batelada e cinco biodigestores semicontínuos, operados com volume de 10 L, dispostos em caixas d'água de 500 L, contendo água aquecida a 30±2°C, os quais foram previamente descritos por Miranda *et al.* (2012).

Para a alimentação dos biodigestores batelada e semicontínuos, os dejetos foram colhidos separadamente por dietas. Os dejetos foram isentos de cama, água de lavagem e de chuvas e continham quantidades desprezíveis de sobras de alimentos. Para a carga inicial de todos os biodigestores foram utilizados dejetos frescos, porém para as cargas diárias dos biodigestores semicontínuos, os dejetos foram congelados em porções previamente pesadas para cada dia. Todos os substratos foram formulados para conterem 6% de sólidos totais (ST).

O tempo de retenção foi de 105 dias para os biodigestores batelada e o tempo de retenção hidráulica (TRH) foi de 30 dias para os biodigestores semicontínuos durante as cargas diárias que ocorreram após um período

**Tabela I.** Componentes dos substratos utilizados para partida dos biodigestores e composição química dos substratos de biodigestores batelada e das cargas diárias dos biodigestores semicontínuos (Components of the substrates used to startup the digesters and chemical composition of the substrates used to feed batch digesters and to daily load semi-continuous digesters).

Tipo de biodigestor e substrato	Dejetos (kg)	Água (kg)	Caldo de cana (kg)	pH	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (%)
<b>Batelada</b>						
SM	3,66	6,34	-	5,86±0,21	5,43±0,03	4,84±0,04
CIN	4,07	5,93	-	6,19±0,32	5,28±0,07	4,71±0,01
CINC	4,07	5,33	0,60	6,26±0,24	6,13±0,07	5,53±0,01
CHCV	4,05	5,95	-	5,99±0,32	5,50±0,17	4,81±0,04
CHCVC	4,05	5,35	0,60	6,06±0,25	6,38±0,37	5,74±0,10
<b>Semicontínuos</b>						
SM	3,66	6,34	-	6,04±0,31	6,02±0,35	5,46±0,30
CIN	4,07	5,93	-	6,48±0,35	5,34±0,15	4,86±0,13
CINC	4,07	5,93	-	6,46±0,28	6,61±0,19	6,09±0,17
CHCV	4,05	5,95	-	6,87±0,29	5,75±0,16	5,12±0,13
CHCVC	4,05	5,95	-	6,90±0,25	6,89±0,45	6,23±0,40

SM: água + dejetos de vacas que receberam silagem de milho; CIN: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CINC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*.; HCV: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem; CHCVC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem.

de partida de 48 dias. O experimento com biodigestores semicontínuos foi paralisado aos 50 dias de cargas diárias devido um acidente que comprometeu a estrutura do prédio em que os mesmos estavam instalados.

O caldo de cana utilizado foi da mesma cana-de-açúcar fornecida aos animais, cuja extração foi realizada logo após a colheita e utilizado imediatamente, ou congelado em pequenas quantidades. Nos biodigestores batelada o caldo de cana foi adicionado inicialmente e, nos semicontínuos, as adições foram efetuadas por ocasião das cargas diárias.

Os valores de pH e os teores de ST e de sólidos voláteis (SV) dos substratos e dos efluentes (cinco vezes por semana nos biodigestores semicontínuos) foram determinados segundo metodologia descrita por APHA (2012).

Foram realizadas análises quinzenais de alcalinidade, por titulometria, em amostras de efluentes de biodigestores semicontínuos durante as cargas diárias, de acordo com metodologia avaliada e recomendada por Ribas *et al.* (2007).

As produções de biogás foram calculadas com base nos deslocamentos dos gasômetros no selo d'água e então realizadas as correções para as condições normais de temperatura e pressão.

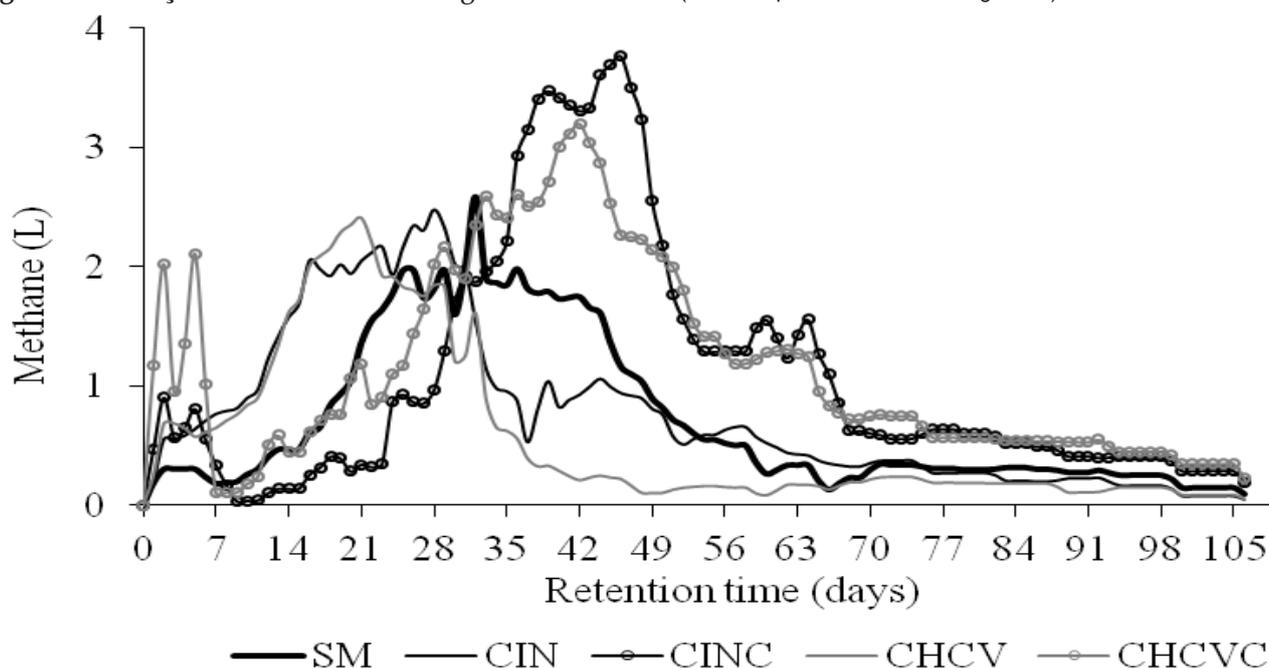
A análise do biogás quanto aos teores de CH<sub>4</sub> e de dióxido de carbono foi realizada semanalmente em cromatógrafo de fase gasosa, Finnigan, modelo GC-9001, equipado com coluna Porapack-Q, peneira molecular, temperatura constante do forno de 60 °C e detector de condutividade térmica ajustado para 100 °C. Gás hidrogênio foi utilizado como gás de arraste.

Para a análise de variância dos dados de redução de SV e dos potenciais de produção de CH<sub>4</sub> dos biodiges-

tores batelada utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e três repetições por tratamento. Para a análise de variância dos dados de redução de SV e de potenciais de produção de CH<sub>4</sub> dos biodigestores semicontínuos foi utilizado o delineamento em blocos casualizados. Cada biodigestor foi considerado uma unidade experimental e cada semana de avaliação do período de cargas diárias foi considerada como um bloco (cofator). Após a análise de variância, quando necessário, a comparação de médias foi realizada por meio do teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alguns valores iniciais de pH dos substratos dos biodigestores batelada foram ligeiramente inferiores a 6,0 o que poderia atrapalhar o processo de digestão anaeróbia de acordo com Abbasi *et al.* (2012) e Krishania *et al.* (2013) (**tabela I**). Apesar disso, todos os substratos apresentaram produção de biogás ao longo do experimento (**figura 1**). Na prática, a adição de caldo de cana nos substratos poderia ocasionar uma formação rápida de ácidos e diminuição brusca do pH devido o fornecimento de carboidratos prontamente solúveis que de acordo com Brandão *et al.* (2008) são a sacarose, a glicose e a frutose que perfazem 20% do conteúdo do caldo de cana. Contudo, ao final do processo, o pH dos efluentes dos biodigestores batelada variaram de 7,25 a 7,76 (**tabela II**) o que indica que embora muitos ácidos tenham sido formados, estes foram consumidos ao longo do tempo. Uma variação de pH de 6,5 a 8,5 é reconhecida como ideal para a digestão anaeróbia (Anderson *et al.*, 2003; Abbasi *et al.*, 2012). Portanto, os valores de pH dos efluentes obtidos no presente trabalho apresentaram-se dentro da faixa recomendada para o processo de digestão anaeróbia.

**Figura 1.** Produção de metano nos biodigestores batelada (Methane production in batch digesters).

SM: água + dejetos de vacas que receberam silagem de milho; CIN: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CINC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CHCV: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem; CHCVC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem.

Os teores de ST e SV dos substratos e dos efluentes (tabelas I e II) dos biodigestores batelada contendo caldo de cana (CINC e CHCVC) foram ligeiramente aumentados em relação aos substratos que não o continham (CIN e CHCV) devido ao acréscimo de sólidos proporcionado pelo caldo de cana, embora este seja composto por 80% de água (Brandão *et al.*, 2008). Contudo, após o processo de digestão anaeróbia, verificou-se que não houve diferença nas reduções de SV dos substratos (tabela III) e a média foi de 51%. Diferenças

na redução de ST e SV foram relatadas por Ribeiro *et al.* (2007) conforme tipos de processamento da dieta fornecida aos animais. No presente trabalho, apesar da hidrólise da cana ter sido uma forma de processamento desse alimento, não interferiu nas reduções de SV. Vale ressaltar que as reduções de ST e SV são dependentes, entre outros fatores, da degradabilidade da matéria orgânica e do TRH empregado no processo, o que dificulta comparações com outros trabalhos.

**Tabela II.** Características dos efluentes dos biodigestores (Characteristics of the effluents from digesters).

Tipo de biodigestor e substrato	pH	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (%)	Alcalinidade parcial (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )
<b>Batelada</b>				
SM	7,25±0,09	3,39±0,25	2,91±0,23	-
CIN	7,46±0,06	3,13±0,20	2,65±0,19	-
CINC	7,76±0,10	3,99±0,32	3,31±0,21	-
CHCV	7,27±0,11	3,24±0,56	2,71±0,46	-
CHCVC	7,59±0,07	3,92±0,21	3,29±0,20	-
<b>Semicontínuos<sup>1</sup></b>				
SM	7,46±0,26	2,95±0,35	2,56±0,28	3082±373
CIN	7,49±0,37	2,46±0,65	2,09±0,62	3647±961
CINC	7,51±0,29	3,06±0,76	2,67±0,70	3989±924
CHCV	7,45±0,31	2,92±0,84	2,44±0,75	4380±831
CHCVC	7,46±0,27	3,46±0,63	3,02±0,54	4662±605

<sup>1</sup>Durante o período de cargas diárias; SM: água + dejetos de vacas que receberam silagem de milho; CIN: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CINC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CHCV: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem; CHCVC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem.

**Tabela III.** Reduções de sólidos voláteis (SV) e potenciais de produção de metano nos biodigestores (Volatile solids removal and methane yields from digesters).

	Redução de SV (%) <sup>1</sup>	CH <sub>4</sub> (L g SV <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub> (L g substrato <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>
Batelada			
SM	50,15	0,193 <sup>C</sup>	0,020 <sup>B</sup>
CIN	54,42	0,217 <sup>B</sup>	0,023 <sup>B</sup>
CINC	46,60	0,254 <sup>A</sup>	0,028 <sup>A</sup>
CHCV	54,79	0,222 <sup>B</sup>	0,021 <sup>B</sup>
CHCVC	51,52	0,262 <sup>A</sup>	0,029 <sup>A</sup>
Semicontínuos			
SM	52,30	0,172 <sup>B</sup>	0,028 <sup>BC</sup>
CIN	53,37	0,156 <sup>B</sup>	0,022 <sup>C</sup>
CINC	52,43	0,226 <sup>A</sup>	0,038 <sup>A</sup>
CHCV	47,20	0,168 <sup>B</sup>	0,026 <sup>C</sup>
CHCVC	50,37	0,188 <sup>B</sup>	0,036 <sup>AB</sup>

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si ( $p > 0,05$ ). Coeficientes de variação (%): Biodigestores batelada<sup>1</sup> 11,59; <sup>2</sup> 3,16; <sup>3</sup> 2,88; biodigestores semicontínuos <sup>1</sup> 12,63; <sup>2</sup> 10,60; <sup>3</sup> 16,67; SM: água + dejetos de vacas que receberam silagem de milho; CIN: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CINC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CHCV: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem; CHCVC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem.

Observou-se que os substratos de biodigestores batelada contendo caldo de cana apresentaram picos de CH<sub>4</sub> logo na primeira semana do abastecimento, ao que se seguiram quedas acentuadas de produção e retomada da mesma após a segunda semana (**figura 1**). Isso provavelmente ocorreu pelo fato do caldo de cana disponibilizar carboidratos prontamente solúveis que podem ter contribuído para a acidificação acentuada do substrato em virtude de serem facilmente hidrolisados, formando quantidade excessiva de ácidos, prejudicando a metanogênese por alguns dias em razão da queda de pH. Fato semelhante foi observado por Chen and Hashimoto (1996) em substratos contendo glicose.

As bactérias formadoras de ácidos têm crescimento rápido mesmo em meio acidificado ao passo que as bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas crescem mais lentamente (Anderson *et al.*, 2003; Manyi-Loh *et al.*, 2013). Então, os ácidos formados podem não ser rapidamente convertidos em metano pelas arqueas metanogênicas porque elas são muito sensíveis a quedas no pH (Brown *et al.*, 2012). Logo, quando o ambiente se torna ácido pela presença de ácidos graxos voláteis, o grupo predominante de microrganismos é aquele que resiste ao pH ácido conseguindo aproveitar os nutrientes do meio, liberando subprodutos que podem não ser aproveitados por outros grupos de microrganismos afetados pelas condições de pH alteradas. De fato, o desempenho de biodigestores pode diminuir com a adição de outro substrato (ex.: caldo de cana) se os microrganismos não estão aclimatados e demorar algum tempo para estabilização e produção de CH<sub>4</sub> (Usack and Angenent, 2015).

Por esses motivos, os substratos CINC e CHCVC apresentaram produções mais expressivas de CH<sub>4</sub> apenas a partir do 28º dia do processo, ao passo que seus respectivos sem caldo de cana, os substratos CIN e CHCV, após 14 dias do abastecimento. Maiores produções de CH<sub>4</sub> do substrato SM ocorreram após 21

dias e por aproximadamente 21 dias apresentaram-se intermediárias em relação aos demais substratos.

Até o 28º dia do processo, o teor médio de CH<sub>4</sub> no biogás do substrato CINC foi de 40,44% e do CHCVC, de 53,40%. Com esses teores de CH<sub>4</sub> presume-se que a atividade metanogênica não foi suprimida totalmente, mas inibida em parte, com uso lento dos precursores de CH<sub>4</sub>.

As maiores produções de CH<sub>4</sub> pelos substratos contendo caldo de cana, provavelmente se deveram ao acréscimo de SV proporcionado pelo caldo. As quantidades adicionais de SV nos substratos CINC e CHCVC, em relação ao CIN e ao CHCV, foram de 82 e 93 g, respectivamente.

Houve diferença entre os potenciais de produção de CH<sub>4</sub> dos substratos dos biodigestores batelada (**tabela III**). O potencial de CH<sub>4</sub> dos substratos CINC e CHCVC foi de 0,26 L de CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>; dos substratos CIN e CHCV, a média foi de 0,22 L de CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> e do substrato SM foi de 0,19 L de CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>. Xavier *et al.* (2015) relataram rendimentos de 0,17 L de CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>; Otero *et al.* (2011) de 0,23 L de CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> e Møller *et al.* (2014) de 0,26 L de CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> em biodigestores batelada operados com dejetos de vacas em condições mesofílicas, próximos aos valores obtidos no presente estudo. Considerando-se o potencial de produção de CH<sub>4</sub> por grama de substrato, os substratos contendo caldo de cana apresentaram os maiores rendimentos, com média de 0,029 L de CH<sub>4</sub> g substrato<sup>-1</sup> contra 0,021 L de CH<sub>4</sub> g substrato<sup>-1</sup> apresentada pelos substratos que não continham caldo de cana.

Como silagem de milho é o volumoso mais comum na alimentação de vacas em lactação, o potencial de produção de CH<sub>4</sub> por dejetos de animais alimentados com esse material poderia ser utilizado como um padrão para comparações. Nesse contexto, verificou-se que os substratos CIN e CHCV renderam 12% mais CH<sub>4</sub> (L g SV<sup>-1</sup>) em relação ao substrato SM, uma van-

tagem do ponto de vista da reciclagem energética dos dejetos desde que não haja redução no desempenho dos animais. Os substratos CINC e CHCVC renderam 25% mais  $\text{CH}_4$  em relação ao substrato SM e 15% em relação aos substratos CIN e CHCV, vantagens provavelmente devidas ao acréscimo de caldo de cana.

Os valores de pH dos diferentes substratos utilizados para a alimentação diária dos biodigestores semicontínuos foram próximos entre si, variando entre 6,04 a 6,90; e aos valores recomendados para o processo de digestão anaeróbia (tabela I). Os valores de pH dos efluentes variaram de 7,45 a 7,51 (tabela II), mais elevados em relação ao pH dos substratos e entre os valores que favorecem o crescimento dos microrganismos.

Os substratos dos biodigestores semicontínuos que continham caldo de cana também apresentaram teores de ST e SV ligeiramente maiores em relação aos substratos que não o continham (tabela I). No entanto, os teores de ST e SV dos efluentes (tabela II) foram próximos entre si e nenhuma diferença estatística foi observada na redução de SV, cuja média também foi de 51% (tabela 3), semelhante àquela obtida nos biodigestores batelada. Embora os valores sejam semelhantes, o tempo de fermentação nos biodigestores batelada foi de 105 dias contra 30 dias nos biodigestores semicontínuos, o que indicou que os biodigestores semicontínuos foram mais eficientes na remoção de SV por unidade de tempo.

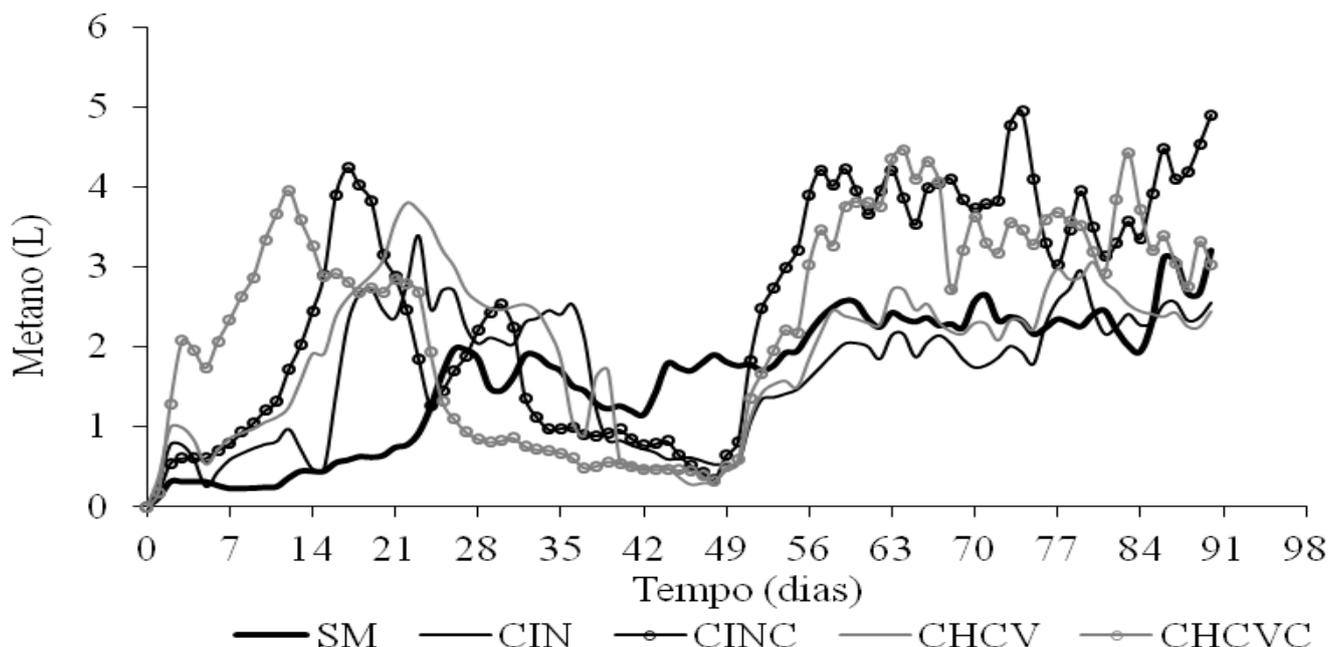
A alcalinidade representa a habilidade do substrato de neutralizar os ácidos formados durante o processo (Shoen *et al.*, 2009). Quando o substrato perde essa habilidade, ocorre o acúmulo de ácidos graxos voláteis e a falência do processo de digestão anaeróbia. No presente trabalho, optou-se pela apresentação da alcalinidade parcial que é uma medida da concentração de bicarbonatos e um dos parâmetros que indicam a estabilidade

do processo de digestão anaeróbia (Ward *et al.*, 2011). Para Jenkins *et al.* (1991) a AP inferior a  $1\,200\text{ mg CaCO}_3\text{ L}^{-1}$  indica estresse no biodigestor, podendo ser um limite mínimo operacional para um bom funcionamento do processo. Já para Anderson *et al.* (2003) alcalinidade total entre  $2\,000$  e  $3\,000\text{ mg CaCO}_3\text{ L}^{-1}$  é um nível comumente encontrado em biodigestores estabilizados. Em nenhum momento do monitoramento os valores de alcalinidade parcial foram iguais ou inferiores  $1\,200\text{ mg CaCO}_3\text{ L}^{-1}$  (tabela II) indicando que mesmo quando houve elevada formação de ácidos graxos voláteis nos substratos, esta foi compensada pela produção de bicarbonatos.

Quedas na alcalinidade total de biodigestores em condições estáveis e na produção de biogás foram observadas por Sundh *et al.* (2003) após sobrecarga única de 15 e 25 vezes mais glicose no substrato, evidenciando que carboidratos prontamente solúveis levam ao acúmulo de ácidos graxos voláteis e inibição da metanogênese, o que não ocorreu no presente estudo devido ao baixo nível de inclusão de caldo de cana.

O substrato CHCVC apresentou mais de  $600\text{ mg CaCO}_3\text{ L}^{-1}$  em relação ao SM, o que representa uma vantagem para a manutenção do pH do meio. É provável que a cal virgem utilizada para hidrólise da cana-de-açúcar fornecida para os animais continue exercendo efeito no pH de substratos de biodigestores contendo os dejetos de animais alimentados com ela.

Nenhum dos substratos dos biodigestores semicontínuos recebeu caldo de cana na fase de partida. Porém, nessa fase (primeiros 48 dias), observaram-se diferenças no comportamento de produção de  $\text{CH}_4$  dos substratos. Substratos contendo dejetos de animais alimentados com cana-de-açúcar apresentaram produções de  $\text{CH}_4$  mais expressivas e antecipadas em relação ao substrato SM (figura 2).



**Figura 2.** Produção de metano nos biodigestores semicontínuos (Methane production in semi-continuous digesters).

SM: água + dejetos de vacas que receberam silagem de milho; CIN: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CINC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar *in natura*; CHCV: água + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem; CHCVC: água + caldo de cana + dejetos de vacas que receberam cana de açúcar hidrolisada com cal virgem.

Logo após o início das cargas diárias, os substratos CINC e CHCVC apresentaram elevadas produções de  $\text{CH}_4$ , quase o dobro em relação aos demais substratos. Fato semelhante foi reportado por Fang *et al.* (2011) ao operarem reatores semicontínuos com subprodutos da indústria de açúcar (polpa de beterraba e melaço desaçucarado) com dejetos de vacas.

O potencial de produção de  $\text{CH}_4$  do substrato CINC foi de 0,226 L de  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$  superior aos apresentados pelos demais substratos cuja média foi de 0,171 L de  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$ , ou seja, uma diferença de 24% (tabela 3). Valores próximos aos obtidos no presente trabalho foram reportados por Xavier & Lucas Júnior (2010), em termos de biogás, em biodigestores operados com dejetos de vacas leiteiras. Rendimentos de  $\text{CH}_4$  semelhantes também foram relatados por Camarillo *et al.* (2012) de 0,23 L de  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$  e superiores por Xavier *et al.* (2015) que operaram biodigestor semicontínuo de grande escala com dejetos de vacas diluídos em água porém com maior concentração de ST, de 0,26 L de  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$ .

O substrato CINC rendeu 24% mais  $\text{CH}_4$  (L g  $\text{SV}^{-1}$ ) em relação aos demais substratos avaliados.

Com relação aos potenciais de produção de  $\text{CH}_4$  por grama de substrato, não houve diferença entre os substratos CINC e CHCVC, os quais apresentaram média de 0,037 L de  $\text{CH}_4$  g substrato $^{-1}$ . O substrato CHCVC apresentou potencial de  $\text{CH}_4$  estatisticamente semelhante ao do SM cuja média foi de 0,028 L de  $\text{CH}_4$  g substrato $^{-1}$ . Não houve diferença entre os potenciais de  $\text{CH}_4$  dos substratos SM, CIN e CHCV, a média desses tratamentos foi de 0,025 L de  $\text{CH}_4$  g substrato $^{-1}$ .

Diferenças na produção de  $\text{CH}_4$  também foram encontradas por Amon *et al.* (2006) ao avaliarem a digestão anaeróbia de dejetos de vacas de diferentes níveis de produção de leite em consequência da intensificação na alimentação dos animais.

A diferença na produção de  $\text{CH}_4$  por dejetos oriundos de animais que receberam diferentes dietas pode estar relacionada com a digestibilidade dos alimentos (Møller *et al.*, 2014) e o balanço de nutrientes dos substratos (Anderson *et al.*, 2003; Abbasi *et al.*, 2012). O fornecimento de alimentos com altos teores de lignina e, conseqüentemente, mais lignina nos dejetos, pode refletir no processo de digestão anaeróbia, com menor quantidade de  $\text{CH}_4$  produzido por unidade de dejetos ou de SV adicionados, como observado no trabalho de Møller *et al.* (2014).

Além disso, parte da produção de  $\text{CH}_4$  de alguns substratos estudados no presente trabalho foi proveniente do caldo de cana que contribuiu com carbono e outros nutrientes. As vantagens do uso de material rico em carbono como caldo de cana, melaço, vinhaça e glicerina codigeridos com dejetos são o adequado balanço de nutrientes e maior potencial de tamponamento (Fang *et al.*, 2011; Westerholm *et al.*, 2012; Castrillón *et al.*, 2013) que são fatores que favorecem o desenvolvimento dos microrganismos da digestão anaeróbia e, portanto, a produção de  $\text{CH}_4$ .

Nos dois tipos de biodigestores estudados, a produção de  $\text{CH}_4$  foi superior quando o substrato foi composto por dejetos de vacas que receberam cana-de-açú-

car e caldo de cana. Os menores potenciais de produção de metano por SV apresentados pelos biodigestores semicontínuos justificam-se pelo menor tempo de retenção dos dejetos nesses biodigestores em relação aos biodigestores batelada.

Em ensaios preliminares, a inibição do processo de digestão anaeróbia ocorreu em substratos com mais de 8% de caldo de cana (Xavier e Lucas Júnior, 2009) para dejetos provenientes de vacas que receberam silagem de milho como volumoso. Para evitar problemas de sobrecarga com a utilização de aditivos ricos em açúcares, Fang *et al.* (2011) recomendaram maiores diluições dos mesmos para melhorar o desempenho da digestão anaeróbia. No presente trabalho, a dose de caldo de cana utilizada (6%) causou sobrecarga nos biodigestores batelada no início do processo, perceptível pela queda na produção de  $\text{CH}_4$ . Nos biodigestores semicontínuos, o caldo de cana causou maiores variações na produção de  $\text{CH}_4$  com maiores quedas para o substrato CHCVC próximo aos dias 70, 80 e 90 do experimento e para o substrato CINC próximo ao dia 77. Essas variações podem ser devidas ao acúmulo de ácidos graxos voláteis e formação lenta de  $\text{CH}_4$  já que caldo de cana era fornecido continuamente nesses substratos, causando determinada sobrecarga nos biodigestores. O aumento de produção de  $\text{CH}_4$  após as quedas podem ser explicadas pela aclimação das metanogênicas com conseqüente aumento do uso dos nutrientes do substrato e, portanto, nova elevação na produção de  $\text{CH}_4$ .

## CONCLUSÕES

A inclusão de 6% de caldo de cana-de-açúcar causa variação na produção diária de  $\text{CH}_4$  sem, contudo, reduzir o pH e a alcalinidade parcial abaixo dos níveis recomendados e afetar a redução de SV.

Dejetos de animais alimentados com silagem de milho renderam 0,19 e 0,17 L  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$  nos biodigestores batelada e semicontínuos, respectivamente. Dejetos de animais alimentados com cana-de-açúcar *in natura* ou hidrolisada com cal virgem renderam quantidades semelhantes de  $\text{CH}_4$  tanto nos biodigestores batelada quanto nos semicontínuos, médias de 0,22 e 0,16 L  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$ , respectivamente. Dejetos de animais alimentados com cana *in natura* mais caldo de cana como aditivo possibilita a obtenção de 0,25 e 0,23 L  $\text{CH}_4$  g  $\text{SV}^{-1}$  em biodigestores batelada e semicontínuos, respectivamente, ou seja, incrementos de 15 a 24% em relação aos demais substratos. Portanto, a adição de caldo de cana-de-açúcar (6%, volume/volume) incrementa o rendimento de  $\text{CH}_4$  em biodigestores operados com dejetos de vacas.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasil.

## BIBLIOGRAFIA

Abbasi, T.; Tauseef, S.M. and Abbasi, S.A. 2012. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation – an overview. *Renew Sust Energ Rev*, 16: 3228-3242.

- Anderson, K.; Sallis, P. and Uyanikt, S. 2003. Anaerobic treatment processes. In: D. Mara and N. Horan (Eds.). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Academic Press. London. pp. 391-426.
- Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Bodiroza, V.; Pötsch, E. and Zollitsch, W. 2006. Optimizing methane yield from anaerobic digestion of manure: effects of dairy systems and of glycerine supplementation. *Int Congr Ser*, 1293: 217-220.
- Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Zollitsch, W.; Mayer, K.; Gruber, L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. *Agric Ecosyst Environ*, 118: 173-182.
- American Public Health Association - APHA. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22<sup>nd</sup> ed. APHA. Washington.
- Brandão, L.V.; Nery, T.B.R.; Machado, B.A.S.; Esperidião, M.C.A. e Druzian, J.I. 2008. Produção de goma xantana obtida a partir do caldo de cana. *Cienc Tecnol Aliment*, 28: 217-222.
- Brown, D.; Shi, J. and Li, Y. 2012. Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresour Technol*, 124: 379-386.
- Camarillo, M.K.; Stringfellow, W.T.; Jue, M.B.; Hanlon, J.S. 2012. Economic sustainability of a biomass energy project located at a dairy in California, USA. *Energ Policy*, 48: 790-798.
- Castriellón, L.; Fernández-Nava, Y.; Ormaechea, P.; Marañón, E. 2013. Methane production from cattle manure supplemented with cude gycerin from the biodiesel industry in CSTR and IBR. *Bioresource Technol*, 127: 312-317.
- Chen, T.H. and Hashimoto, A.G. 1996. Effects of pH and substrate: inoculum ratio on batch methane fermentation. *Bioresour Technol*, 56:179-186.
- Fang, C.; Boe, K. and Angelidaki, I. 2011. Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure. *Water Res*, 45: 3473-3480.
- Galbiatti, J.A.; Caramelo, A.D.; Silva, F.G.; Gerardi, E.A.B.; Chiconato, D.A. 2010. Estudo quali quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*, 14: 432-437.
- Jenkins, S.R.; Morgan, J.M. and Zhang, X. 1991. Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *JJ Water Pollut Control Fed*, 63: 28-34.
- Krishania, M.; Kumar, V.; Vijay, V.K. and Malik, A. 2013. Analysis of different techniques used for improvement of biomethanation process: a review. *Fuel*, 106: 1-9.
- Manyi-Loh, C.E.; Mamphweli, S.N.; Meyer, E.L; Okoh, A.I.; Makaka, G. and Simon, M. 2013. Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *Int J Environ Res Public Health*, 10: 4390-4417.
- Miranda, A.P.; Lucas Júnior, J.; Thomaz, M.C.; Pereira, G.T. and Fukayama, E.H. 2012. Anaerobic biodigestion of pig feces in the initial, growing and finishing stages fed with diets formulated with corn or sorghum. *Appl Eng Agric*, 32: 47-59.
- Møller, H.B.; Sommer, S.G. and Ahring, B.K. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass Bioenerg*, 26: 485-495.
- Møller, H.B.; Moset, V.; Brask, M.; Weisbjerg, M.R. and Lund, P. 2014. Feces composition and manure derived methane yield from dairy cows: influence of diet with focus on fat supplement and roughage type. *Atmos Environ*, 94: 36-43.
- Silva Neto, H.F.; Pauli, F.A.; Tasso Júnior, L.C.; Marques, M.O. 2014. Porcentagem de sacarose aparente e potencial produtivo de açúcar em cultivares de cana. *Sci Agropecu*, 5: 53-58.
- Oliveira, A.S.; Detmann, E.; Campos, J.M.S.; Pina, D.S.; Souza, S.M. and Costa, M.G. 2011. Meta-análise do impacto da fibra em detergente neutro sobre o consumo, a digestibilidade e o desempenho de vacas leiteiras em lactação. *Rev Bras Zootecn*, 40: 1587-1595.
- Oliveira, M.D.S.; Rêgo, A.C.; Sforcini, M.P.R.; Freitas Júnior, E.; Santos, J. and Carvalho, M.V. 2012. Bromatological characteristics and *in vitro* digestibility of four sugarcane varieties subjected or not to the application of quicklime. *Acta Sci*, 34: 355-361.
- Otero, M.; Lobato, A.; Cuetos, M.J.; Sánchez, M.E. and Gómez, X. 2011. Digestion of cattle manure: thermogravimetric kinetic analysis for the evaluation of organic matter conversion. *Bioresource Technol*, 102: 3404-3410.
- Ribeiro, G.M.; Sampaio, A.A.M.; Fernandes, A.R.M.; Henrique, W.; Sugohara, A. and Amorim, A.C. 2007. Efeito da fonte protéica e do processamento físico do concentrado sobre a terminação de bovinos jovens confinados e o impacto ambiental dos dejetos. *Rev Bras Zootecn*, 36: 2082-2091.
- Ribas, M.M.F.; Moraes, E.M. and Foresti, E. 2007. Avaliação da acurácia de diversos métodos para a determinação de ácidos graxos voláteis e alcalinidade a bicarbonato para monitoramento de reatores anaeróbios. *Eng Sanit Ambient*, 12: 240-246.
- Shoen, M.A.; Sperl, D.; Gadermaier, M.; Goberna, M.; Franke-Whittle, I.; Insam, H.; Ablinger, J. and Wett, B. 2009. Population dynamics at digester overload conditions. *Bioresour Technol*, 100: 5648-5655.
- Sundh, I.; Carlsson, H.; Nordberg, A.; Hansson, M.; Mathisen, B. 2003. Effects of glucose overloading on microbial community structure and biogas production in a laboratory-scale anaerobic digester. *Bioresour Technol*, 89: 237-243.
- Siddique, N.I.; Munaim, M.S.A. and Zularizam, A.W. 2014. Mesophilic and thermophilic biomethane production by co-digesting pretreated petrochemical wastewater with beef and dairy cattle manure. *J Ind Eng Chem*, 20: 331-337.
- Usack, J.G. and Angenent, L.T. 2015. Comparing the inhibitory thresholds of dairy manure co-digesters after prolonged acclimation periods: part 1 - performance and operating limits. *Water Res*, (Article in press): 1-12.
- Ward, A.J.; Hobbs, P.J., Holliman, P.J. and Jones, D.L. 2011. Evaluation of near infrared spectroscopy and software sensor methods for determination of total alkalinity in anaerobic digesters. *Bioresour Technol*, 102: 4083-4090.
- Westerholm, M.; Hansson, M. and Schnürer, A. 2012. Improved biogas production from whole stillage by co-digestion with cattle manure. *Bioresour Technol*, 114: 314-319.
- Xavier, C.A.N. and Lucas Júnior, J. 2009. Caldo de cana-de-açúcar na biodigestão anaeróbia de dejetos de vacas em lactação: biodigestores contínuos. <http://www.ambiente-augm.ufscar.br/uploads/A2-103.pdf>. (29/01/2015).
- Xavier, C.A.N.; Lucas Júnior, J. 2010. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras. *Appl Eng Agric*, 30: 212-223.
- Xavier, C.A.N.; Moset, V.; Wahid, R. and Møller, H.B. 2015. The efficiency of shredded and briquetted wheat straw in anaerobic co-digestion with dairy cattle manure. *Biosystems Eng*, 139: 16-24.