

EFEITO DA ADIÇÃO DE INÓCULO NO PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE DEJETOS DE BOVINO

Sérgio Rufino de Lima Junior – sergiorljunior@gmail.com

Juliana Lobo Paes – juliana.lobop@yahoo.com.br

Thais Barbosa Serpa Alves – bsathati@gmail.com

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia

Resumo. A biodigestão anaeróbia é uma alternativa promissora para o tratamento dos resíduos oriundos das atividades pecuaristas, promovendo benefícios para o meio ambiente e para o poder econômico do produtor. Os resíduos quando não acondicionados de forma correta apresentam alta capacidade poluidora, causando impactos ao meio ambiente e riscos à saúde humana. Por outro lado, quando tratados em biodigestores, ocorre a degradação da matéria orgânica produzindo o biofertilizante e o biogás. O presente trabalho foi realizado no laboratório de Eletrificação Rural e Energias Alternativas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com o objetivo de avaliar a produção de biogás a partir do tratamento da biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos sob doses de 0, 20 e 40% de inóculo bovino:suíno 4:1. Os biodigestores de bancada sistema de batelada estiveram em funcionamento por 112 dias. Realizou-se as análises de produção de biogás, pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), DBO, DQO, microbiológica, índice de explosividade, concentração de H₂S, CO e O₂. Com os resultados obtidos, determinou-se o potencial de produção de biogás por kg de substrato, de ST adicionados e SV adicionados. Observou-se antecipação do pico para a segunda semana e maior produção total de biogás para os tratamentos com 20 e 40% de inóculo, enquanto o tratamento com 0% de inóculo teve o pico na sexta semana. O tratamento com inóculo de 20% apresentou o melhor potencial de produção de biogás por kg de substrato, de ST adicionados e de SV adicionados. Com relação às análises de caracterização do efluente, observou-se aumento no valor de pH e redução na CE, ST e SV, DBO, DQO e coliformes termotolerantes, em todas as doses aplicadas. Com esses resultados é possível concluir a influência positiva e eficiente do uso de doses de inóculo na produção de biogás.

Palavras-chave: Biogás, Características físicas, Características microbiológicas

1. INTRODUÇÃO

A agropecuária no Brasil é uma atividade de grande magnitude para o cenário econômico nacional. Em 2004, o Brasil assumiu a liderança de exportação mostrando significativo crescimento no setor, possuindo atualmente o segundo maior rebanho bovino (Mapa, 2011). Com o aumento da demanda, ocorre a maior criação de animais e, por consequência maior produção de resíduos. Estes resíduos devem ser acondicionados de maneira adequada, que seja ambientalmente correta e economicamente viável.

Sendo assim, uma alternativa para o aproveitamento desses resíduos é o uso dos dejetos para produção de energia através da implantação de biodigestores. O princípio de funcionamento consiste na biodigestão anaeróbia, onde ocorre a transformação da matéria orgânica nos subprodutos biogás e biofertilizante.

A composição do biogás é uma mistura de gases com maior concentração de metano (60%), seguido por dióxido de carbono (35%) e pequenas quantidades de outros gases, como o ácido sulfídrico (Wellinger e Lindbergh, 2001). O metano é um dos principais gases causadores do efeito estufa (Ranzi *et al.* 2004). O biogás produzido em biodigestores é considerado uma fonte de energia renovável e de queima limpa (Santana *et al.* 2012). Assim, uma desvantagem do descarte inadequado dos dejetos consiste no desperdício do biogás produzido, podendo ser usado como fonte energética na própria propriedade rural (Cervi *et al.* 2010).

Além das vantagens ambientais, a utilização de biodigestores para recuperação de biogás se insere em um mercado extremamente promissor que é o comércio de créditos de carbono previsto no Protocolo de Kyoto, estimulando os governos a implantarem biodigestores nas propriedades rurais (Gouveia *et al.* 2011; Syzmanski *et al.* 2010).

Nas atividades pecuaristas, é comum a criação de diferentes tipos de animais com a mesma destinação de seus dejetos. Portanto, um tratamento simultâneo dos dejetos seria de grande importância para o produtor e atenderia a realidade do sistema de produção. Dentro deste cenário, a codigestão surge como uma excelente alternativa. Seu processo consiste no tratamento de duas ou mais substâncias biodegradáveis pela biodigestão anaeróbia. A codigestão apresenta vantagens com relação à biodigestão anaeróbia de apenas um substrato, tais como a relação custo-benefício, possível aumento na produção do biogás, melhor eficiência do sistema devido ao efeito de sinergismo entre os co-substratos fornecendo os nutrientes necessários ausentes (Mata-Alvarez *et al.* 2000; Wu, 2007).

Ao fim da codigestão, o efluente gerado pode ser utilizado como inóculo para um processo de biodigestão subsequente. A adição deste material fornece ao novo substrato uma população extra de microrganismos já adaptados no processo de biodigestão anaeróbia, aumentando a atividade dos mesmos e, conseqüentemente, antecipando o pico de produção de biogás (Xavier *et al.* 2010). A quantidade de inóculo além de influenciar na produção do biogás, reduz o

tempo de retenção hidráulica do sistema, ou seja, o período compreendido desde o abastecimento do substrato até o momento em que cessa a produção do biogás, sinalizando o fim do processo (Queiroz, 2003). Um cuidado que deve ser tomado é na forma de adicionar o inóculo ao material a ser digerido. Este processo deve ser feito em frações reduzidas para não ocorrer perdas de microorganismos presentes no inóculo (Vedrenne *et al.* 2008). Baixa eficiência do inóculo, afeta diretamente na produção do biogás, pois o mesmo estará ocupando o volume que poderia ser usado pelo substrato a ser tratado (Xavier *et al.* 2010). A mistura é feita com diferentes doses do inóculo, justamente para se observar o comportamento da produção do gás. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo a avaliação da produção de biogás a partir do processo de biodigestão anaeróbia que foram abastecidos com dejetos de bovinos misturados a inóculos em diferentes doses.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica, cujas coordenadas geográficas são: 22° 45' 33" S e 43° 41' 51". O clima da região é classificado como Aw segundo a classificação de Köppen, com chuvas concentradas no período novembro a março, precipitação anual média de 1213 mm e temperatura média anual de 24,5 °C (Carvalho *et al.* 2006). O processo de biodigestão anaeróbica foi avaliado no período de janeiro a junho de 2016, totalizando em 112 dias.

O sistema de biodigestão anaeróbica foi montado nas dependências do Instituto de Tecnologia – Departamento de Engenharia da UFRRJ. As análises físicas e químicas do efluente foram realizadas no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Águas e efluentes, no Departamento de Engenharia da UFRRJ e as análises microbiológicas no Laboratório de Microbiologia de Alimentos, no Departamento de Tecnologia em Alimentos da UFRRJ. O substrato utilizado nos biodigestores foram inóculo de dejetos de bovino e suíno juntamente com dejetos de bovino, proveniente da PESAGRO- RJ e do setor de Bovinocultura e Suinocultura do Instituto de Zootecnia da UFRRJ. Os dejetos foram coletados 24h antes do início do experimento, a fim de evitar fermentação excessiva e perdas na geração de biogás.

Utilizou-se no experimento bateria de nove protótipos de biodigestores (modelo indiano) constituídos por câmara de fermentação, gasômetro e manômetro de coluna d'água. Os biodigestores foram dispostos sobre bancada, em condições de temperatura ambiente, abrigados da luz solar e chuvas. A câmara de fermentação foi utilizada para acondicionar o substrato e o gasômetro para armazenar o biogás produzido. Como câmara de fermentação foi utilizado um tubo fechado na parte inferior por conexão CAP, ambos em PVC, com diâmetro de 0,10 m e capacidade de 0,0023 m³. Uma mangueira de silicone foi acoplada ao tubo e conectada ao manômetro de coluna d'água. Antes de começar a produção de biogás, o nível de água em ambos os lados do manômetro permaneceu o mesmo. O gasômetro foi montado com tubo e CAP em PVC com diâmetro de 0,15 m. No CAP foi conectado, por meio de uma válvula de três vias, uma mangueira de silicone para a coleta do biogás produzido. A câmara de fermentação esteve inserida no interior do gasômetro. O sistema câmara de fermentação e gasômetro foram inseridos no interior de um tubo com diâmetro de 0,20 m preenchido com água ("selo de água"), para servir de suporte para o gasômetro flutuar, proporcionar condições anaeróbicas e armazenar o gás produzido (câmara de contenção do "selo de água"). Assim, para o funcionamento do gasômetro adotou-se o sistema flutuante. Por esse sistema, à medida que ocorreu a produção de biogás, houve deslocamento na direção vertical ascendente do gasômetro. Esse deslocamento foi medido por uma régua graduada fixa ao gasômetro.

Os biodigestores foram abastecidos com inóculo e substrato diluídos em água (afluente, A) com teores de sólidos totais em torno de 8% (Orrico Jr. *et al.* 2010), nas doses de 0, 20 e 40%. Utilizou-se inóculo no processo de biodigestão na proporção 4:1 bovino:suíno com tempo de retenção hidráulica de 161 dias. Justifica-se esta proporção por ter apresentado maior produção de biogás e melhores características físico-química em trabalhos realizados anteriormente no Laboratório de Eletrificação Rural e Energias Alternativas.

A preparação do substrato utilizado no experimento foi baseada na padronização do teor de sólidos totais em torno de 8% (Salam *et al.* 2015; Otaraku e Ogedengbe, 2013). Para determinação do teor de sólidos totais, utilizou-se a metodologia descrita pela Apha (2005). A partir dos resultados encontrados na análise de sólidos totais, determinou-se a proporção de água a ser acrescentada à amostra a fim de se obter a concentração de trabalho.

A caracterização físico-química do substrato de entrada (afluente) e saída (efluente, E) do biodigestor foi realizada quanto ao potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE, $\mu\text{s cm}^{-1}$) e sólidos totais (ST, %), conforme recomenda a Legislação do CONAMA 375/06 para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. As análises foram realizadas de acordo com a metodologia descrita pela Apha (2005). Para caracterização quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos realizou-se análises biológicas de Coliformes Termotolerantes. Os coliformes termotolerantes foram quantificados pela Técnica do Número Mais Provável (NMP) em tubos múltiplos conforme a Norma Técnica L5-406, recomendada pelo CONAMA 375/06.

O potencial de produção de biogás foi determinado em função de sua produção diária, índice de explosividade e concentração de metano (CH₄), sulfato de hidrogênio (H₂S), monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O₂). As coletas foram realizadas as segundas, quartas e sextas-feiras às dez da manhã. Finalizada a coleta de dados, o gasômetro foi esvaziado, através do registro de descarga do biogás (torneira de ter vias).

O volume de biogás produzido diariamente foi determinado pelo produto do deslocamento vertical do gasômetro e sua área da seção transversal interna durante 16 semanas, ou seja, 112 dias. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20 °C foi efetuada com base no trabalho realizado por Aquino *et al.* (2007), no qual, pelo fator de compressibilidade (Z), o biogás apresenta comportamento próximo ao ideal.

Conforme descrito por Matos *et al.* (2017), para a correção do volume de biogás utilizou-se a expressão resultante da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac, em que a variável V_0 corresponde ao volume de biogás corrigido (m^3), P_0 à pressão corrigida do biogás (mm de H_2O), T_0 à temperatura corrigida do biogás (293,15 K), V_1 ao volume do gás no gasômetro (m^3), P_1 à pressão do biogás no instante da leitura (mm de H_2O) e T_1 à temperatura do biogás no instante da leitura (K) (Eq. 1).

$$\frac{V_0 \times P_0}{T_0} = \frac{V_1 \times P_1}{T_1} \quad (1)$$

Considerando-se a pressão atmosférica de Seropédica igual a 10290,90 mm de coluna d'água e pressão média conferida nos manômetros em mm de H_2O , obteve-se, como resultado, a seguinte expressão para a correção do volume de biogás (Eq. 2).

$$V_0 = \frac{V_1}{T_1} \times 293,9283 \quad (2)$$

A partir dos dados de volume de biogás, avaliou-se a produção semanal e acumulada e o potencial de produção. Os potenciais de produção de biogás foram calculados utilizando-se os dados de produção semanal e as quantidades de substrato, ST adicionados (*STadic.*) e de SV adicionados (*SVadic.*) nos biodigestores. Os valores foram expressos em m^3 de biogás por kg de substrato, ST e SV adicionados.

Após cada leitura, foi medido o Limite Inferior de Explosividade (% *LIE*) com calibração para o gás metano (CH_4) e concentrações de sulfato de hidrogênio (*ppm H₂S*), monóxido de carbono (*ppm CO*) e oxigênio (*vol O₂*) do biogás com o Explosímetro Digital Portátil de 4 Gases da marca Instrutherm.

Para a avaliação dos resultados referentes ao ensaio de biodigestão anaeróbia foi adotado delineamento inteiramente casualizado, constando de três tratamentos (três doses de misturas de inóculo e dejetos e três repetições (biodigestores)). Os resultados do potencial de produção de biogás e das variáveis de caracterização do afluente e efluente foram submetidos à análise de variância seguido do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade pelo programa estatístico SISVAR, versão 5.6. Os gráficos de produção semanal e caracterização do biogás foram feitos utilizando-se o programa computacional Sigma Plot 2001, versão 7.0, para ambiente Windows.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se na Tab. 1 os valores médios de pH e condutividade elétrica no afluente e efluente nas doses de inóculo de 0, 20 e 40%, em que as letras maiúsculas distintas na mesma linha e minúsculas distintas na mesma coluna representam diferenças significativas entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 1- Valores médios de potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica no afluente e efluente.

Doses (%)	pH		CE ($\mu s\ cm^{-1}$)	
	A	E	A	E
0	6,58 Aa	9,56 Ba	843,00 Aa	705,60 Ba
20	6,63 Aa	9,63 Ba	883,47 Aa	775,90 Bb
40	6,93 Aa	8,49 Ba	950,30 Ab	837,80 Bc

Observa-se que embora os valores médios de pH não tenham apresentado diferença significativa entre as doses tanto no afluente como no efluente, houve aumento significativo ao comparar o afluente com o efluente. Assim, os valores médios do pH no afluente e efluente foram de 6,71 e 9,23, respectivamente. No entanto, Steil (2001) ao trabalhar com biodigestores abastecidos com dejetos de suínos com doses de inóculo de 0, 10 e 15%, verificou que a adição do inóculo aumentou o pH do efluente. Ainda segundo esse autor a adição do inóculo ao substrato proporcionou a manutenção do pH próximo ao ideal, em torno de 7,0. Ainda pode-se inferir que os valores de pH das três doses do afluente permaneceram na faixa ideal de pH para a produção de biogás. No entanto, os valores de pH do efluente mantiveram-se fora da faixa ideal. De acordo com Quadros *et al.* (2010) e Sánchez-Hernández *et al.* (2013), a faixa ideal para o desenvolvimento microbiano é compreendido entre 6,0 e 8,0, sendo o valor 7,0 considerado o ideal. Nessa faixa, evita-se comprometer a fase metanogênica, visto que as bactérias atuantes se desenvolvem melhor em condições neutras (Speece, 1996).

No que se refere à condutividade elétrica, o aumento da dose de inóculo promoveu uma tendência para o seu aumento tanto no afluente quanto no efluente. Ao comparar a condutividade elétrica do afluente com o efluente, pode-se notar redução significativa. No entanto, resultados obtidos por Silva *et al.* (2012) no tratamento de biodigestão anaeróbia da vinhaça, apresentou maiores valores de condutividade elétrica no efluente em relação ao afluente. Segundo o autor, a condutividade elétrica está relacionada com a quantidade de íons dissolvidos durante a fase líquida, e o aumento da condutividade elétrica seria explicado pela digestão de uma matéria mais complexa em uma mais simples.

Observa-se na Tab. 2, que não houve diferença estatística ($P > 0,05$) entre o afluente e efluente dos sólidos totais e sólidos voláteis apenas para a dose de 20%. Com relação ao efluente, observa-se ainda que os sólidos totais e voláteis atingiram valores estatisticamente iguais (Tab. 2). Na Tab. 2 as letras maiúsculas distintas na mesma linha e minúsculas distintas na mesma coluna representam diferenças significativas entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 2 - Valores médios de teores de sólidos totais e voláteis, no afluente e efluente nas doses de inóculo de 0, 20 e 40%.

Dose (%)	ST (%)		SV (%)		ST	SV
	A	E	A	E		
0	11,20 Aa	4,89 Ba	1,33 Aab	1,04 Ba	56	22
20	5,63 Ab	4,36 Aa	1,10 Aa	0,95 Aa	22	14
40	6,27 Ab	4,35 Ba	1,55 Ab	0,86 Ba	30	44

Na Tab. 3 pode-se observar que o tratamento com dose de 20% obteve maiores reduções de DBO (90%) e DQO (89%), enquanto a dose 0% menores reduções (78 e 73%, respectivamente). Na Tab. 3, as letras maiúsculas distintas na mesma linha e minúsculas distintas na mesma coluna representam diferenças significativas entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

De acordo com Santos *et al.* (2013), o processo de biodigestão viabiliza a redução do potencial poluidor de DBO em 70%. Segundo Chernicharo (2007) a biodigestão anaeróbia reduz o potencial poluidor da DQO de 60 a 80%. Nota-se que os três tratamentos obtiveram excelentes resultados de redução de DBO e DQO, sendo ainda mais expressivos para os tratamentos com adição de inóculo de 20 e 40%, que obtiveram reduções acima dos 80% (Tab. 3). Reduções de DBO e DQO abaixo do que foi citado por Santos *et al.* (2013) e Chernicharo (2007) podem ser explicadas pela acidificação do meio.

Tabela 3 - Valores médios de demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio, no afluente e efluente nas doses de inóculo de 0, 20 e 40%.

Doses (%)	DBO (mg L ⁻¹)		Redução (%)	DQO (mg L ⁻¹)		Redução (%)
	A	E		A	E	
0	17821,37 Aa	4000,37 Ba	78 a	57747 Aa	15747 Ba	73 a
20	46126,19 Ab	4681,54 Bb	90 b	135150 Ab	15290 Bb	89 b
40	10781,00 Ac	1691,00 Bc	84 c	36115 Ac	7115 Bc	80 c

Os números mais prováveis (NMP) de coliformes termotolerantes presentes nos afluentes e efluentes dos biodigestores abastecidos em três doses, assim como as respectivas porcentagens de redução durante o processo, estão apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 - Valores médios de número mais provável coliformes de termotolerantes no afluente (A) e efluente (E) nas doses de inóculo de 0, 20 e 40%.

Doses (%)	NMP (mg 100mL ⁻¹)		Redução (%)
	A	E	
0	> 1,6 10 ³	1,6 10 ³	-
20	9,2 10 ²	0,23 10 ²	97,5
40	9,2 10 ²	1,7 10 ²	81,5

Para a dose de 0% do afluente não foi possível determinar com exatidão o número mais provável, uma vez que as amostras apresentaram valores superiores a 1600 mg 100mL⁻¹ (Tab. 4). No entanto, observa-se redução da carga microbiana após o processo de biodigestão anaeróbia (Tab. 4). Ao avaliar o afluente com inóculo a 20 e 40%, o número mais provável de coliformes do afluente para essas doses foi igual e inferior ao apresentado em 0% (Tab. 4).

Com relação ao efluente, a maior carga microbiana foi detectada para a dose de 0%, enquanto a menor para 20% (Tab. 4). Observa-se que houve diferença estatística ($P < 0,05$) entre o afluente e efluente para as doses de 20 e 40% (Tab. 4). Ao comparar as doses com mesmo número de coliformes termotolerantes, a dose de 20% apresentou significativa redução (97,5%), seguido pelo tratamento com inóculo a 40% (81,5%) (Tab. 4).

As elevadas reduções de coliformes termotolerantes, indicadores de poluição ambiental, demonstram a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia com adição de inóculo na remoção de microrganismos indicadores de poluição fecal. Segundo Orrico Junior *et al.* (2010), a adição de inóculo permite que os microrganismos presentes se adaptem mais facilmente ao substrato, otimizando a produção de biogás e reduzindo o período de colonização bacteriana.

Resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo foram verificados em Amaral *et al.* (2000) ao verificar a eficiência do biodigestor tipo batelada na redução de microrganismos em estrumes de aves de postura. De acordo com os autores, o processo de biodigestão apresentou maiores reduções nos números de indicadores de coliformes totais e fecais quando na presença de inóculo. Ainda segundo esses autores, o biodigestor tipo batelada com inóculo apresentou menor tempo (a partir de 28 dias de biodigestão) para atingir a ausência de detecção de coliformes fecais em seu efluente.

No que tange sua disposição final, de acordo com a Resolução Conama 274 (2000), o efluente proveniente do tratamento com biodigestor com diferentes doses de inóculo pode ser utilizado em locais de recreação de contato primário e demais usos para água doce classe 1 (Conama, 2005). No entanto, de acordo com a resolução Conama 357 (2005), os efluentes gerados do processo de biodigestão anaeróbia com inóculo a 20 e 40% podem ser utilizados para irrigação de hortaliças e plantas frutíferas, pois as quantidades de coliformes são inferiores a 200 coliformes termotolerantes 100 mL^{-1} de biofertilizante.

Apresenta-se na Fig. 1 a produção do biogás obtida por dejetos de origem bovina sob a utilização de inóculo em três diferentes doses. Na primeira semana do processo, os biodigestores abastecidos com a mistura do dejetos com inóculos nas doses de 20 e 40% apresentaram produção superior ao dejetos com 0%. As doses de 0, 20 e 40% apresentaram, respectivamente, produção inicial de 0,00015, 0,0025 e 0,0028 m^3 de biogás.

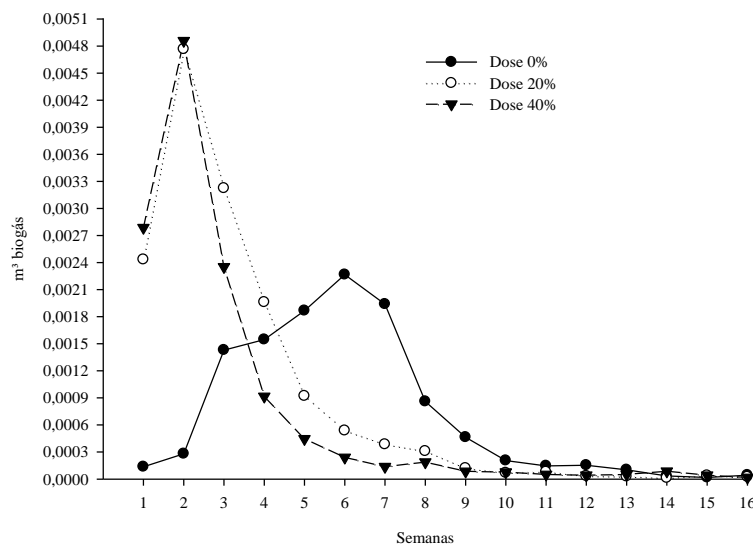


Figura 1- Produção semanal em m^3 de biogás da utilização de inóculo em diferentes doses.

O pico de produção dos biodigestores com inóculos de 20 e 40% ocorreu na segunda semana, sendo aproximadamente $0,0048 \text{ m}^3$ de biogás gerado (Fig. 1). Já o pico de produção do biodigestor com 0% de inóculo ocorreu apenas na sexta semana do processo de biodigestão anaeróbia (Fig. 1). O valor atingido no processo de biodigestão anaeróbia com inóculo a 0% foi a metade ($0,0024 \text{ m}^3$) da produção quando comparado aos testes com inóculos 20 e 40%.

Resultados similares ao apresentado neste estudo foram obtidos por Xavier *et al.* (2010). O trabalho dos autores citados foi feito com dejetos de origem bovina sob inóculo de mesma origem em doses de 0, 20, 30 e 40%. Os biodigestores foram abastecidos com sistema de batelada e tempo de retenção hidráulica de 75 dias para os tratamentos que continham inóculo e 150 dias para os tratamentos sem inóculo. Os resultados mostram que a produção de biogás foi influenciada pela dose de inóculo. Os tratamentos com 30 e 40% tiveram seu pico nas duas primeiras semanas, valores aproximados de $0,02013$ e $0,03548 \text{ m}^3$ respectivamente. No entanto, observou-se que o tratamento com inóculo a 20% apresentou pico retardado e menor produção. O mesmo comportamento foi verificado para o tratamento sem adição de inóculo.

No estudo realizado por Steil (2001), foi observado o comportamento da produção de biogás a partir de dejetos de suínos sob três tratamentos com doses de 0, 10 e 15% de inóculo suíno/frango. Os resultados obtidos apresentaram maior produção de biogás para os tratamentos submetidos a 10 e 15% de inóculo, 0,0573 m³ de biogás. Já o biodigestor com 0% de inóculo apresentou pico de produção de 0,040 m³ de biogás. Embora, segundo o autor, a presença de inóculo tenha aumentado consideravelmente o total de biogás produzido, não exerceu diferenças acentuadas em relação à antecipação de picos de produção.

De acordo com Xavier *et al.* (2010), a adição de inóculo permite maior produção de biogás, maior velocidade de partida e antecipação do pico de produção em relação à biodigestão sem a utilização de inóculo. Segundo os autores, este fato se explica devido à adição de uma população extra de microrganismos especializados e adaptados ao sistema de biodigestão anaeróbia.

Verifica-se ainda na Fig. 1, após o pico de produção logo na segunda semana, uma tendência de decréscimo para as doses de 20 e 40%. O tratamento com dose de 0% de inóculo, que teve seu pico atrasado em relação aos outros, também teve um comportamento de decréscimo (Fig. 1).

Estudos realizados por Xavier *et al.* (2010) e Steil (2001), apresentam resultados que comprovam este comportamento. Estes autores verificaram uma maior produção de biogás no início do processo e um constante decréscimo em seguida, sem que ocorra outro crescimento considerável na produção.

Outra característica importante observada na Fig. 1 é o período de estabilização da produção do biogás. Os três tratamentos estabilizaram na décima terceira semana, ou seja, a produção acumulada de biogás pouco mudou após esse período. Segundo Xavier *et al.* (2010) a estabilização da produção para os tratamentos com diferentes doses de inóculo foi de 70 dias.

Na Tab. 5 pode-se observar que o tratamento com 20% de inóculo obteve a maior produção acumulada de biogás (0,1046 m³ biogás), tendo maior potencial energético expresso em produção de biogás por kg de substrato (0,0608 m³/kg), sólidos totais (1,0801 m³/kg) e sólidos voláteis (5,5104 m³/kg). Na Tab. 5, as minúsculas distintas na mesma coluna representam diferenças significativas entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 5 - Produção acumulada (m³) e potenciais de produção de biogás por kg de substrato, de Sólidos Totais adicionado e de Sólidos Voláteis adicionado

Dose (%)	m ³ biogás	Potenciais (m ³ de biogás/kg)		
		Substrato	ST _{adic}	SV _{adic}
0	0,0805 a	0,0471 a	0,4092 a	3,5379 a
20	0,1046 b	0,0608 b	1,0801 b	5,5104 b
40	0,0867 c	0,0504 c	0,8039 c	3,2519 c

Resultados obtidos por Xavier *et al.* (2010), mostram que no tratamento de dejetos de bovinos com uso de inóculo de origem bovina em três doses (20, 30 e 40%), o tratamento com dose de 40% obteve o maior resultado de produção de biogás (1,2636 m³), além de maior potencial energético em produção de biogás por kg de substrato (0,0211 m³/kg), de sólidos totais adicionados (0,2584 m³/kg) e de sólidos voláteis adicionados (0,3200 m³/kg).

No geral, a dose de inóculo de 20% apresentou melhores resultados que a dose de 40%, o que reforça o fato de analisar corretamente a qualidade e quantidade do inóculo para obter os melhores resultados. Quando a adição de inóculo se encontra em quantidade acima do ideal, ocupa um volume que poderia ser preenchido por resíduo a ser tratado, diminuindo a eficiência do sistema.

O índice de explosividade de um gás é definido pelo seu LEL (Lower Explosive Limit) ou LIL (Limite Inferior de Inflamabilidade) (Silva *et al.* 2010). Este valor quantifica a mínima concentração de gás, que quando em contato com o ar atmosférico pode ocorrer à combustão do produto, a partir de uma fonte de ignição (Avatec, 2016). O aparelho detector dos gases mostra um valor de LEL entre 0 e 100%. Para o metano, o limite inferior de inflamabilidade é de 5%, enquanto o superior é de 15% (Silva *et al.* 2010). Quando no explosímetro mostrar 100% de LEL, significava que naquele momento há 5% de metano existente na mistura do biogás, ou seja, basta haver uma centelha para que ocorra uma explosão (Silva *et al.* 2010).

A Fig. 2 apresenta que nos três tratamentos ocorreram variações, não demonstrando estabilidade ou relação com a quantidade de inóculo na mistura. Uma característica importante é a presença de metano logo na primeira semana de processo de biodigestão anaeróbia (Fig. 2). Os tratamentos com 0, 20 e 40% de inóculo obtiveram o LEL médio de 87, 82 e 84% respectivamente. Estes valores equivalem a 4,35, 4,10 e 4,20 de CH₄ v/v.

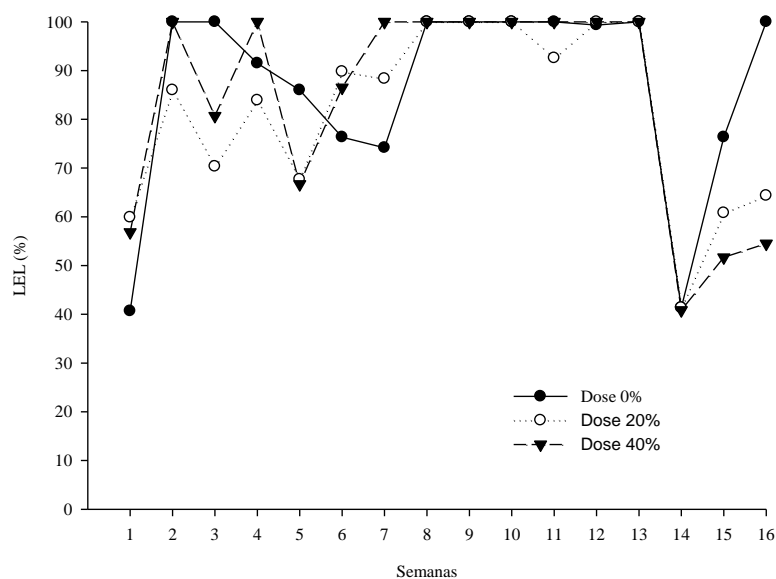


Figura 2 - Limite Inferior de Inflamabilidade do biogás produzido nas doses 0, 20 e 40%.

Em termos de composição do biogás, o monóxido de carbono juntamente com o nitrogênio, hidrogênio e outros constituem as menores concentrações quando comparado com o metano e o dióxido de carbono (Wellinger e Lindbergh, 2001). O biogás gerado ao longo do processo de biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos sob doses de 0, 20 e 40% de inóculo bovino:suíno 4:1 apresentou pico de produção na segunda semana seguido de decréscimo. As médias dos tratamentos 0, 20 e 40% foram de 14, 10 e 9 ppm, respectivamente.

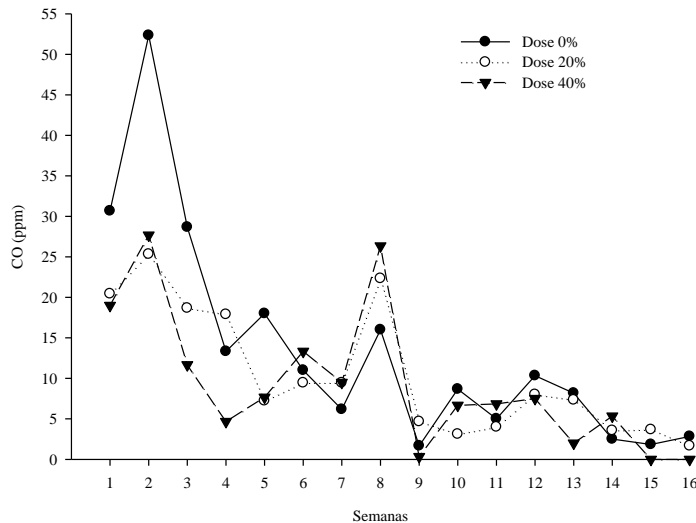


Figura 3 - Monóxido de carbono produzido nas doses 0, 20 e 40%.

A Fig. 4 mostra que, independente das doses as concentrações de H_2S foram maiores durante as primeiras semanas. No entanto, o tratamento com 0% de inóculo apresentou valor médio superior a 20 e 40%. Os valores médios de H_2S para as doses 0, 20 e 40% foram de 6, 3 e 2 ppm, respectivamente. A importância na quantificação do H_2S consiste na conversão do biogás em energia, uma vez que este é o principal composto a ser removido (Couturato *et al.*, 2016). Segundo Villalobos (2011), durante o processo de combustão há formação de óxidos de enxofre e ácido sulfúrico pelo H_2S , o que reduz a vida útil das tubulações e dos equipamentos de aproveitamento do biogás. Em soma, os microrganismos sulfato-redutores competem pela matéria orgânica presente no meio com os microrganismos produtores de metano favorecendo a redução do metano no biogás (Gottschalk, 1979, Lens *et al.*, 1998, Elferink *et al.*, 1994; Colleran *et al.*, 1995).

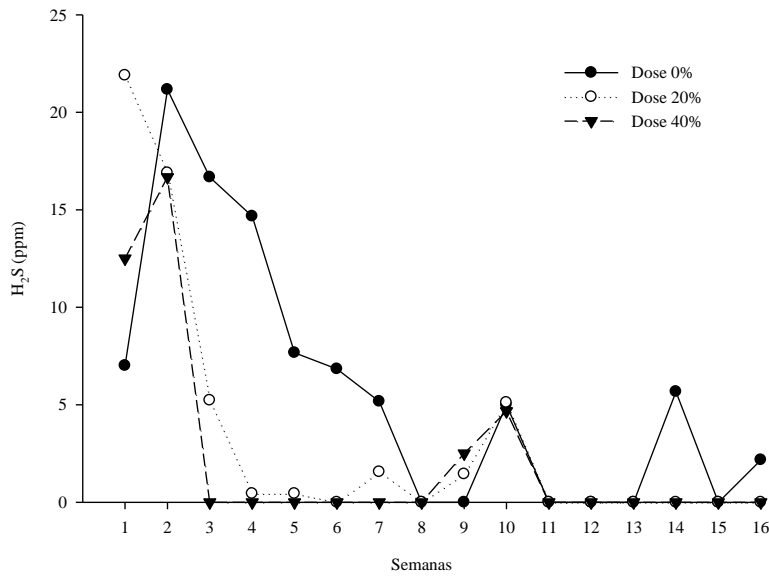


Figura 4 - Sulfeto de hidrogênio produzido nas doses 0, 20 e 40%.

Na Fig. 5, observa-se que inicialmente o tratamento sem inóculo apresentou elevada concentração de oxigênio, enquanto com 20 e 40% de inóculo próximo de zero. A partir da 3ª até a 13ª semana de biodigestão anaeróbica, pode-se observar similaridade nos três tratamentos, com exceção para 40%. Nesse tratamento, na 11ª semana houve um pico na concentração de oxigênio. Na 14ª semana, observa-se um pico de O₂ nos três tratamentos, tendo como valor máximo inferior a 16% de volume de O₂. O aumento na concentração de O₂ pode estar relacionado com a estabilização na produção de biogás devido ao desenvolvimento bacteriano, conforme demonstrado na Fig. 1.

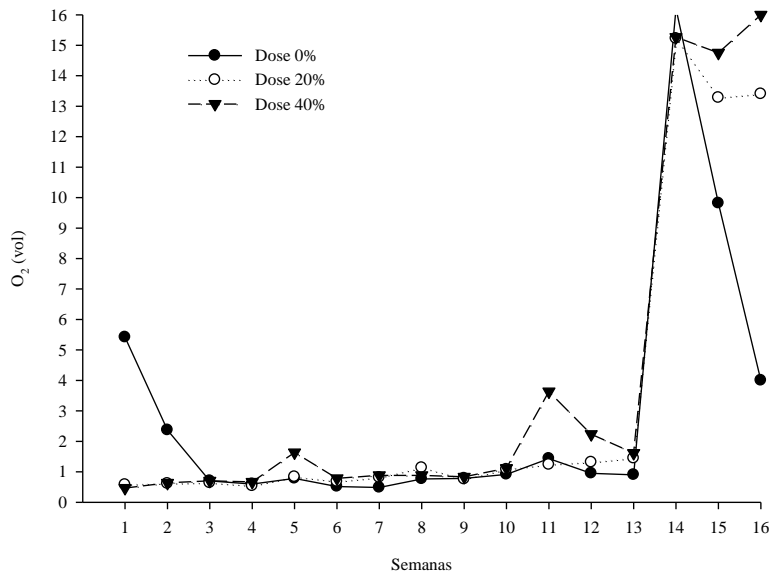


Figura 5 - Oxigênio produzido nas doses 0, 20 e 40%.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o processo de biodigestão anaeróbica com adição de inóculo demonstrou ser uma alternativa eficiente para o tratamento de dejetos de bovinos, pois permitiu maior produção de biogás, maior velocidade de partida e antecipação do pico de produção em relação à biodigestão sem a utilização de inóculo. Além disso, nos tratamentos com adição de inóculo, obtiveram-se maiores reduções de DBO e DQO (maior que 80%) e coliformes termotolerantes. Em razão da adaptação ao meio, o tratamento com 20% de inóculo obteve a maior produção de biogás tendo maior potencial energético expresso em produção de biogás por kg de substrato, sólidos totais e sólidos voláteis.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela bolsa de Iniciação científica concedida para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Amaral, L.A., Schocken, D.B.L., Lucas JR., J., 2000. Redução de bactérias indicadoras de poluição fecal em estrume de aves de postura tratados por biodigestão anaeróbia, *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, vol. 2, n. 1, pp. 27-30.
- Aquino, S.F., Chernicharo, C.A., Foresti, E., Santos, de L.L. dos., Monteggia, L.O., 2007. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios, *Eng. sanit. ambient.*, vol. 12, n. 2, pp. 192-201.
- American Public Health Association – APHA, 2005. *Standard methods for examination of water and wastewater*, Washington: American Water Works Association, ed. 21, pp. 1386.
- Avatec. Limite Inferior de Explosividade. Disponível em: <http://www.avatec.com.br/manual_periculo_inflamaveis018.htm>. Acesso em: 18 de Junho de 2016.
- Carvalho, T., Antunes, M.N., 2006. Créditos de carbono e geração de energia com uso de biodigestores no tratamento de dejetos suínos, *Revista Acadêmica Ciência Animal*, vol. 4, n. 3, pp. 23-32.
- Cervi, R.G., Esperancini, M.S.T., Bueno, O.C., 2010. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica, *Engenharia Agrícola*, vol. 30, n. 5, pp. 831-844.
- Chernicharo, C.A.L., 2007. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios*, Belo Horizonte: Editora UFMG, vol. 5, ed. 2, pp. 379.
- Colleran, E.; Finnegan, S.; Lens, P., 1995. Anaerobic treatment of sulfate-containing waste streams. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology*, v. 67, n. 1, pp. 29-46.
- Colturato, L.F.D.B., Faria, J.P.deO., Motta, V.S., Santos, L.L.dos., Chernicharo, C.A.deL., 2016. Avaliação de lavador de gases do tipo Venturi, operando com solução de hidróxido de sódio, para dessulfuração de biogás com altas concentrações de H₂S. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, pp. 65-76.
- Conama. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Padrões de qualidade para os parâmetros monitorados na rede de monitoramento, segundo Resolução CONAMA 357/2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/>>. Acesso em: 22 de Junho de 2016.
- Conama. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N 274 de 29 de Novembro 2000. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res00/res27400.html>>. Acesso em: 22 de Junho de 2016.
- Elferink, S.; Visser, A.; Pol, L.W.H.; Stams, A.J.M., 1994. Sulfate reduction in methanogenic bioreactors. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 15, n. 2-3, pp. 119-136.
- Gouveia, N., Mesquita, L., 2011. Mercado do Carbono. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Departamento de Patentes e Modelos de Utilidades, pp. 31. Disponível em: <http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/Mercado%20do%20Carbono.pdf>. Acesso em: 21 de junho de 2016.
- Gottschalk, G., 1979. *Bacterial Metabolism*. New York: Springer, 359p.
- Lens, P.N.L.; Visser, A.N.L.; Janssen, A.J.H.; Hulshoff Pol, L.W.; Lettinga, G., 1998. Biotechnological Treatment of Sulfate-Rich Wastewaters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 28, n. 1, pp. 41-88.
- Mapa. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011. Bovinocultura. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 10 de abril de 2016.
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., Llabrés, P., 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes: an overview of research achievements and perspectives, *Bioresource Technology*, vol. 74, n.1, pp. 3-16.
- Matos, C.F., Paes, J.L., Pinheiro, E.F.M., Campos, D.V.B., 2017. Produção de biogás a partir de dejetos de bovinos de leite, sob sistema orgânico e convencional de produção, *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 37, n. 6.
- Orrico Júnior, M.A.P., Orrico, A.C.A., Lucas Júnior, J.de, 2010. Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos, *Engenharia Agrícola*, vol. 30, n. 3, pp. 386-394.
- Otaraku, I.J., Ogedengbe E.V., 2013. Biogas production from sawdust waste, cow dung and water hyacinth effect of sawdust concentration, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, vol. 2, n. 6, pp. 91-93.
- Quadros, D.G.de, Oliver, A.de P.M., Regis, U., Valladares, R., Souza, P.H.F. de, Ferreira, E.deJ., 2010. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 14, n. 3, pp. 326-332.
- Queiroz, S. C., 2003. Modelagem da produção acumulada de biogás em biodigestores tipo batelada segundo a porcentagem de inoculo adicionada utilizando os modelos de regressão não-linear de Gompertz e exponencial, Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

- Ranzi, T.J.D., Andrade, M.A.N., 2004. Estudo de viabilidade de transformação de esterqueiras e bioesterqueiras para dejetos de suínos em biodigestores rurais visando o aproveitamento do biofertilizante e do biogás, Universidade Estadual de Campinas, Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, Campinas.
- Salam, B., Biswas, S., RabbI, M.S., 2015. Biogas from Mesophilic Anaerobic Digestion of Cow Dung Using Silica Gel as Catalyst, *Procedia Engineering*, vol. 105, pp. 652-657.
- Sánchez-Hernández, E.P., Weiland, P., Borjab, R., 2013. The effect of biogas sparging on cow manure characteristics and its subsequent anaerobic biodegradation, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 83, pp. 10-16.
- Santana, L.E., Cintra, L.M.L., 2012. A biodigestão como solução para a destinação dos resíduos do setor pecuarista, *Revista da Ciência da Administração*, vol. 6, pp. 1-16.
- Santos, E. L. B., Nardi Junior, G., 2013. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal biogás, *Tekhn e Logos*, vol. 4, pp. 81-90.
- Silva, J.R.daG. da, Rocha, T.deA., Ferreira, A.deS., 2010. A importância de detecção de gases para prevenção de danos à segurança, meio ambiente e saúde: fontes de interferência em sinais 4 a 20 Ma. Disponível em: <essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1845/1023>. Acesso em: 28 abr. 2017.
- Silva, W.T.S., Novaes, A.P., Kuroki, V., Martelli, L.F.A., Magnoni Jr., L., 2012. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbico para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola, *Química Nova*, vol. 35, n. 1, pp. 35-40.
- Speece, R. E. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*, 1996. United States: Archæ Press, pp. 16.
- Steil, L., 2001. Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbica de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Araraquara.
- Szymanski, M.S.E., Balbinot, R., Schirmer, W.N., 2010. Biodigestão anaeróbica da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso, *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, vol. 31, n. 4, pp. 901-912.
- Vedrenne, F., Béline, F., Dabert, P., Bernet, N., 2008. The effect of incubation conditions on the laboratory measurement of the methane producing capacity of livestock wastes, *Bioresource Technology*, vol. 99, n. 1, pp. 146-155.
- Villalobos, I.D., 2011. H₂S free biogas. From anaerobic to microaerobic, Tese de Doutorado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Wellinger, A., Lindbergh, A., 2001. Biogas Upgrading and Utilisation, IEA Bioenergy Task 24: Energy from Biological Conversion of Organic Waste, pp. 1-20.
- Wu, W., 2007. Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements, [S.l.]: Iowa State University, pp. 1-10. Disponível em: <<http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/wei.pdf>>. Acesso em: 08 de abril de 2016.
- Xavier, C.A.N., Junior, J.L., 2010. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo, *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 30, n. 2, pp. 212-223.
- Yorgos, R., 2012. Detecção de Gases. Técnicas de Medição em Espaços Confinados. Disponível em: <<http://www.yorgos.com.br/noticia/materias>>. Acesso em: 21 de junho de 2016.

ADDITION OF INOCULUM EFFECT IN THE PROCESS OF ANAEROBIC DIGESTION OF CATTLE MANURE

Abstract. *Anaerobic digestion is a promising alternative for the treatment of cattle ranchers activities waste, promoting benefits to the environment and to the producer economic power. Waste when not properly packed present high polluting capacity, causing environmental impacts and risks to human health. On the other hand, when treated in biodigesters, occurs the organic matter degradation, producing biogas and biofertilizer. This study was conducted in the laboratory of Rural Electrification and Renewable Energies at Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, in order to evaluate the production of biogas from the anaerobic digestion treatment of cattle manure in doses of 0, 20 and 40% of bovine inoculum: swine 4:1. The bench batch digesters system was in operation for 112 days. The biogas analysis, pH, electrical conductivity (EC), total solids (TS), volatile solids (VS), BOD, COD, microbiological, explosivity index, concentration of H₂S, CO and O₂ were done. The results obtained determined the biogas potential per kg of substrate, per TS added and per VS added. It was observed the anticipation of the peak for the second week and an increased biogas production for treatments of 20 and 40% of inoculum, whereas treatment with 0% inoculum had the peak at sixth week. Treatment with 20% inoculum showed the best biogas production potential per kg of substrate, of TS added and VS added. Regarding the effluent characterization analysis was observed an increase in pH and a reduction in EC, TS and VS, BOD, COD and thermotolerant coliforms, at all doses applied. With these results we conclude the positive influence of the inoculum doses use in biogas production making the anaerobic digestion model suitable and efficient.*

Keywords: *Biogas, physical characteristics, microbiological characteristics.*