

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA  
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**ÁGUA RESIDUÁRIA DE LATICÍNIO EM CO-DIGESTÃO COM  
DEJETOS DE BOVINOS LEITEIROS**

**ALINE FERNANDES**

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Campus  
de Botucatu, para obtenção do título  
de Mestre em Agronomia (Energia  
na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Julho - 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA  
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**ÁGUA RESIDUÁRIA DE LATICÍNIO EM CO-DIGESTÃO COM  
DEJETOS DE BOVINOS LEITEIROS**

**ALINE FERNANDES**

Orientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Campus  
de Botucatu, para obtenção do título  
de Mestre em Agronomia (Energia  
na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Julho - 2016





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



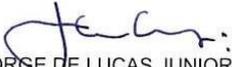
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "ÁGUA RESIDUÁRIA DE LATICÍNIO EM CO-DIGESTÃO COM DEJETOS BOVINOS LEITEIROS"

AUTORA: ALINE FERNANDES

ORIENTADOR: JORGE DE LUCAS JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JORGE DE LUCAS JUNIOR  
Depto de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. MARCO ANTONIO MARTIN BIAGGIONI  
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP

  
Profa. Dra. LAURA VANESSA CABRAL DA COSTA  
Departamento de Engenharia / UNIARA - Araraquara/SP

Botucatu, 06 de julho de 2016.

Dedico a minha mãe e minhas irmãs, pelo empenho  
para que tudo em minha vida fosse realizado  
com a maior suavidade possível.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por tudo que já realizou em minha vida e por ser meu amparo nos momentos de dificuldades sendo força e luz para eu alcançar meus objetivos.

Aos meus pais que por mais protetores e preocupados permitiram e apoiaram a realização dessa conquista. As minhas irmãs pela alegria e amor que sempre motivaram a seguir em frente.

A Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia: Energia na Agricultura, aos professores e funcionários por me oferecer a valiosa oportunidade de cursar o mestrado.

A CNPq pela concessão de bolsa de pesquisa, a qual foi indispensável para realização desse trabalho.

Ao Professor Jorge de Lucas Junior, pela orientação, pelo conhecimento transmitido, por confiar e se disponibilizar às viagens ao Laticínio para buscarmos material de trabalho.

Aos Professores membros da banca examinadora da Qualificação e Defesa, Marco Antônio Martin Biaggioni, Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim e Laura Vanessa Cabral da Costa que gentilmente aceitaram o convite e contribuíram com esse trabalho.

A Usina de Laticínios Jussara S/A – Patrocínio Paulista, pela confiança e gentileza em doar à água residuária do laticínio para ser possível a realização do experimento. Em especial a Morgania, que sempre gentilmente nos recebeu se disponibilizando com ajudas e informações e pela boa vontade do João que nos ajudou nas colheitas do material.

Aos meus amigos Alex, Juliana e Paula pela ajuda diária e explicações na condução do experimento e Stela pela companhia no laboratório. Junto a eles ao Max e a Laura pelos momentos de descontração e alegria.

Aos funcionários Ailton, Luís Claudio, Maranhão, Tiãozinho e senhor Vadeco, por toda ajuda prática e pela boa convivência. De modo especial a todos os funcionários e professores da Engenharia Rural – Unesp Jaboticabal que me recebeu.

Aos meus familiares pela demonstração de carinho e motivação para que tudo corresse bem. E aos meus amigos que mesmo de longe sempre pude contar com suas orações e torcida.

Ao Vitor pela amizade, carinho e por me fazer gargalhar nos dias mais complicados.

A Paula pela amizade, por me acolher como “filha mimada” quando precisei e pelas palavras sinceras de incentivo.

A Yara e a Aline pelos conselhos e esclarecimentos de dúvidas sendo luz em muitos momentos e por me acolherem sempre quando precisei de um pouso em Botucatu.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	IX
RESUMO .....	1
SUMMARY .....	3
1 INTRODUÇÃO .....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	7
2.1 Bovinocultura leiteira.....	7
2.2 Agroindústria láctea .....	9
2.3 Geração e poluição de resíduos líquidos da agroindústria láctea.....	10
2.4 Biodigestores.....	15
2.5 Processo de biodigestão anaeróbia.....	16
2.6 Produtos gerados a partir da biodigestão anaeróbia .....	18
2.7 Processo de co-digestão .....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	24
3.1 Local do experimento e obtenção dos componentes do substrato.....	24
3.2 Descrição dos biodigestores .....	26
3.3 Ensaio de co-digestão .....	28
3.4 Análises realizadas .....	31
3.4.1 Potencial hidrogeniônico (pH).....	31
3.4.3 Teores de sólidos totais.....	31
3.4.4 Teores de sólidos voláteis .....	32
3.4.5 Determinação do volume de biogás e cálculo dos potenciais de produção de biogás .....	32
3.4.6 Mensuração de metano do biogás .....	33
3.4.7 Digestão sulfúrica e determinação dos minerais.....	33
3.5 Delineamento experimental.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
4.1 Co-digestão em biodigestores bateladas.....	36
4.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH).....	36
4.1.2 Sólidos totais e voláteis e reduções de sólidos voláteis .....	37
4.1.3 Produção de biogás .....	38
4.1.4 Potenciais de produção .....	50

4.1.5 Nutrientes .....	42
4.2 Co-digestão em biodigestores contínuos .....	42
4.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH).....	42
4.2.2 Sólidos totais e voláteis e reduções de sólidos voláteis .....	45
4.2.3 Produção de biogás e mensuração de metano.....	47
4.2.4 Potenciais de produção de biogás .....	50
4.2.5 Determinação de minerais .....	52
5 CONCLUSÕES.....	53
6 REFERÊNCIAS .....	54

## LISTA DE TABELAS

		Página
TABELA 1.	Características da água residuária de laticínio utilizada nos períodos do segundo experimento, com biodigestores contínuos .....	25
TABELA 2.	Quantidades de substratos em Kg adicionados aos biodigestores bateladas.....	28
TABELA 3.	Quantidades de substratos em kg adicionados aos biodigestores contínuos diariamente.....	30
TABELA 4.	Valores médios de pH dos substratos utilizados em biodigestores bateladas.....	36
TABELA 5.	Teores médios de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e redução de sólidos voláteis (SV red) para biodigestores bateladas operados com dejetos de bovinos em co-digestão com água residuária de laticínio.....	38
TABELA 6.	Produção média total, em m <sup>3</sup> , de biogás obtidos de biodigestores bateladas operados com dejetos de bovinos em co-digestão com água residuária de laticínio.....	39
TABELA 7.	Médias de potenciais de produção de biogás, por m <sup>3</sup> de biogás por Kg: de estrume, sólidos totais e voláteis adicionados (ST e SV adc.), sólidos voláteis reduzidos (SV red.).....	40
TABELA 8.	Teores de nitrogênio (N) e fósforo (P) nos efluentes dos biodigestores bateladas.....	42
TABELA 9.	Teores médios de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em %, e redução de sólidos voláteis (SV) para os biodigestores abastecidos com substratos do primeiro período.....	46
TABELA 10.	Teores médios de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em %, e redução de sólidos voláteis (SV) para os biodigestores abastecidos com substratos do segundo período.....	46
TABELA 11.	Médias de produção de biogás, por m <sup>3</sup> de biogás por Kg: de dejetos (DEJ), sólidos totais e sólidos voláteis adicionados (ST e SV ad.), sólidos voláteis adicionados reduzidos.....	46
TABELA 12.	Médias de produção de biogás, por m <sup>3</sup> de biogás por Kg: de dejetos (DEJ), sólidos totais adicionados (ST ad.), sólidos totais reduzidos (ST red.), sólidos totais voláteis adicionados (SV ad.) e sólidos totais (red.)....	51
TABELA 13.	Teores de macro nutrientes nos efluentes dos biodigestores contínuos.....	52

## LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1.	Fluxograma de tratamento de efluente e ponto de colheita.....	26
FIGURA 2.	Visão interna do biodigestor batelada.....	27
FIGURA 3.	Visão geral do biodigestor contínuo e do gasômetro.....	28
FIGURA 4.	Efluente - tratamento 0% ARL.....	41
FIGURA 5.	Efluente - tratamento ARL.....	41
FIGURA 6.	Valores médios do pH dos afluentes e efluentes no decorrer do primeiro período experimental dos biodigestores contínuos.....	43
FIGURA 7.	Valores médios do pH dos afluentes e efluentes no decorrer do segundo período experimental dos biodigestores contínuos.....	44
FIGURA 8.	Temperatura ambiente durante o período experimental (°C).....	45
FIGURA 9.	Produções de biogás obtido em biodigestores contínuos operados com dejetos bovinos e dejetos bovinos em co-digestão com 50% de água residuária de laticínio.....	47
FIGURA 10.	Produções de biogás obtidas em biodigestores contínuos operados com dejetos bovinos e dejetos bovinos em co-digestão com 63,5% de água residuária de laticínio.....	48
FIGURA 11.	Valores médios de metano (CH <sub>4</sub> ) em % nos tratamentos sem e com 50% água residuária no primeiro período .....	49
FIGURA 12.	Valores médios de metano (CH <sub>4</sub> ) em % nos tratamentos sem e com 63,5% água residuária no segundo período .....	50

**LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

$\text{mg L}^{-1}$  = Miligrama por litro

DQO= Demanda química de oxigênio

CIP= Clean in Place

$\text{P}_2\text{O}_5$ = Pentóxido de fósforo

$\text{K}_2\text{O}$ = Óxido de Potássio

$\text{CaO}$  = Óxido de cálcio

$\text{MgO}$ = Óxido de Magnésio

kg= quilograma

$\text{m}^3$  = Metros cúbicos

$\text{CH}_4$ = Metano

$\text{CO}_2$ = Dióxido de carbono

$\text{NaCl}$ = Cloreto de sódio

$\text{Cu}$ =Cobre

$\text{Cr}$ = Cromo

$\text{NH}_3$ = Amônia

$\text{K}$ = Potássio

$\text{Mg}$  = Magnésio

$\text{Ni}$ = Níquel

$\text{kcal/m}^3$  = Quilocaloria/metro cúbico

PVC= Policloreto de vinila

ST= Sólidos totais

SV= Sólidos voláteis

$\text{N}_2$ = Nitrogênio

$\text{H}_2\text{S}$ = Ácido Sulfídrico

## RESUMO

A pecuária leiteira bem como a industrialização do leite produzem resíduos que podem impactar o meio se lançados de forma imprópria. Sendo assim, objetivou-se avaliar o efeito da co-digestão de água residuária de laticínio com dejetos bovinos em biodigestores do tipo batelada e contínuo sobre a produção de biogás e biofertilizante. O experimento foi dividido em duas fases. A primeira fase desenvolvida com biodigestores batelada e a segunda subdividida em dois períodos com biodigestores contínuos. Avaliou-se o efeito da inclusão de água residuária de laticínio (ARL) na primeira etapa: 0% de ARL, 50% de ARL, 77,5% de ARL, 100% de ARL e tratamento ARL. Para segunda fase no primeiro período tratamento com 0% de ARL e 50% de ARL. E no segundo período com tratamentos de 0% ARL e 63,5% ARL. Para análise dos dados considerou-se um delineamento inteiramente casualizado, utilizando-se o programa SAS<sup>®</sup> com nível de significância de 5%. Para a primeira fase, observou-se que o tratamento ARL foi o que apresentou menor produção de biogás (0,00753 m<sup>3</sup>) em relação aos demais. Para os potenciais de produção o tratamento com 50% de ARL apresentou as menores médias. Nos dois períodos da segunda fase, ou seja, com biodigestores contínuos, os resultados demonstram que os tratamentos contendo água residuária foram eficientes sem diferença de produção de biogás entre os tratamentos. O aproveitamento da água residuária para compor substrato em co-digestão com dejetos bovinos leiteiros apresentou condições favoráveis de produção e qualidade de biogás e biofertilizante.

PALAVRAS - CHAVE: biofertilizante, biogás, bovinocultura, digestão anaeróbia, efluente de laticínio.

DAIRY RESIDUAL WATER CO-DIGESTION WITH DAIRY CATTLE MANURE. Botucatu, 2016. 73p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ALINE FERNANDES

Adviser: JORGE DE LUCAS JUNIOR

## **SUMMARY**

The dairy farming and industrialization of milk produce waste that may impact the environment if disposed improperly. Thus, this study aimed to evaluate the effect of co-digestion of dairy production wastewater with cattle manure in biodigesters in the batch and continuous type on the production of biogas and biofertilizers. The experiment was divided into two phases. The first phase developed with batch digesters and second divided in two periods with continuous digesters. We evaluated the effect of the inclusion of dairy wastewater (DW) in the first stage: 0% of DW, 50% of DW, 77,5% of DW, 100% of DW and DW treatment. For the second phase the first treatment period with 0% and 50% DW. And in the second period with treatments of 0% and 63.5% DW. Data analysis was considered a completely randomized design, using the SAS® program with 5% significance level. For the first phase, it was observed that the DW treatment showed the lower production of biogas (0.00753 m<sup>3</sup>) compared to the others treatments. For the production potential treatment with 50% of DW had the lowest means. In the second phase in both periods, with continuous digesters, the results show that the treatments containing wastewater were effective and there is no difference in biogas production between the treatments. The use of wastewater to form substrate co-digestion of

dairy cattle manure showed favorable production conditions and quality of biogas and biofertilizers.

**KEYWORDS:** anaerobic digestion, biofertilizers, biogas, cattle, dairy effluent.

## 1 INTRODUÇÃO

A pecuária criada em sistema intensivo de produção leiteira é um setor de direto e indireto potencial poluidor sobre o meio ambiente. A atividade pode levar a poluição ambiental por meio da grande quantidade na produção de resíduos (dejetos) e por meio do beneficiamento e industrialização do seu produto *in natura*, o leite, que gera resíduo líquido com alta carga orgânica, denominado soro ou pela lavagem dos equipamentos constituindo água residuária de laticínios.

Os impactos ambientais procedidos da pecuária leiteira abrangem o âmbito atmosférico, na forma de geração de gases de efeito estufa, bem como a disponibilidade de água potável quando resíduos como fezes, sobras de ração, urina e limpeza das instalações e a água residuária obtido na industrialização do leite são descartados no ambiente de forma imprópria.

A composição da água residuária de laticínios é variável de acordo com as características químicas do leite utilizado e o processo de industrialização destinado à cada tipo de produto lácteo, assim variando teores de sua composição. Entretanto, é considerada efluente que antes de ser descartada em um corpo hídrico necessita passar por uma estação de tratamento.

Há indústrias lácteas que mesmo de forma ilegal ainda descartam a água residuária sem tratamento, incorporando no corpo d'água receptor materiais poluidores.

Os setores envolvidos em questão tem grande importância econômica e social por gerar renda desde aos pequenos produtores às grandes empresas.

Portanto, é fundamental a importância de se enquadrarem de forma legal às condições ambientais de todo manejo de produção.

A fim de minimizar os danos da pecuária leiteira e de laticínios sobre o meio, diferentes ações podem ser tomadas para garantir a sustentabilidade dos setores. Dentre estas, cita-se o uso de biodigestores, pois estes, além de se relacionarem a mitigação da poluição pelos dejetos da pecuária leiteira e resíduos de laticínios, fornecem o biogás e o biofertilizante.

No interior dos biodigestores ocorre a biodigestão anaeróbia. Esta consiste na fermentação, com ausência de oxigênio, de dejetos animais, plantas e lixo (doméstico e urbano) através de bactérias anaeróbias que sintetizam a matéria orgânica. Assim sendo, a biodigestão anaeróbia torna-se uma alternativa apropriada por promover o tratamento de afluentes e fornecer, o biogás e o biofertilizante, os quais, respectivamente, poderão ser utilizados para gerar energia e adubação orgânica com alto teor de nutrientes.

Algumas características dos resíduos sólidos orgânicos que serão fermentados podem dificultar a digestão anaeróbia. A co-digestão dos resíduos sólidos orgânicos com outros tipos de resíduos líquidos otimiza o processo de tratamento devido ao estabelecimento da umidade adequada requerida ao processo de digestão e a melhoria no balanço de nutrientes.

A adição de água residuária de laticínio aos dejetos de bovinos é um exemplo de co-digestão. A água residuária geralmente apresenta uma flora microbiana reduzida, pois é gerado num processo industrial dentro de padrões sanitários de alto grau de rigidez podendo levar tempos elevados para a biodegradação, porém apresenta alta carga orgânica. Requer-se, então, uma complementação, ou seja, uma inoculação de micro-organismos para maior eficiência no processo e dentre as diversas formas de aumentar a carga microbiana destaca-se o uso de dejetos bovinos, que possuem uma alta carga desses micro-organismos, além de ser uma alternativa conjugada para o tratamento desses dois tipos de resíduos.

Assim, para encontrar uma forma de tratamento da água residuária de laticínio para que esta não seja grande poluente hídrico, mas sim ter uma aplicação viável a minimizar os impactos do setor, objetivou-se avaliar a produção e composição do biogás e do biofertilizante em biodigestores do tipo batelada e contínuo abastecidos com água residuária de laticínio em co-digestão com dejetos de bovinos leiteiros.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Bovinocultura leiteira**

O aumento da demanda por alimentos e a evolução tecnológica na produção fez com que a atividade agrícola moderna caracterize por sistemas padronizados e simplificados. Esse modelo da produção agropecuária tem mostrado sinais de saturação, em virtude da elevada demanda por energia e por recursos naturais (BALBINO et al., 2011).

Outra consequência dessa evolução é o aumento da participação no mercado internacional de commodities agrícolas, em especial de proteínas de origem animal, o que torna mais presente a exigência dos consumidores para que seja realizada uma produção sustentável. Isso implica, necessariamente, o tratamento da biomassa residual, e a geração de energia contribuindo para a viabilização econômica (BLEY JUNIOR et al., 2009).

O Brasil, pela sua imensa área e pelo seu clima favorável, apresenta grande potencial para produzir leite e carne, tendo as pastagens tropicais como principal fonte de alimento para os animais. O país, a médio e longo prazo, pode se tornar um importante exportador de leite e produtos lácteos, assim como ocorre com a carne bovina (FERREIRA, 2012). Nesse cenário, de acordo com ANUALPEC (2015), o Brasil ocupa a 5ª posição no ranking de produção mundial de leite e teve em 2014 uma produção nacional de leite equivalente a 27.389.355 mil litros.

Durante muitos anos a bovinocultura brasileira foi considerada uma atividade com poucos danos ambientais, em especial pelo manejo de criação adotado, onde grandes áreas eram utilizadas para produção de um número reduzido de animais. Com isso havia uma deposição uniforme dos resíduos e em quantidades que o próprio meio tinha capacidade de absorver sem causar grandes problemas ao meio ambiente (ORRICO JÚNIOR, 2011).

O confinamento de animais surgiu como uma alternativa para aumentar a produtividade que compete à necessidade de produção de alimentos em grande escala, pela possibilidade de manejar rebanhos leiteiros com melhor conforto permitindo melhores níveis de produção, sem afetar a saúde geral dos animais, mas novos problemas surgiram com os sistemas de confinamento (PERISSINOTTO et al. 2009).

Bordin et al. (2005) citam que a criação de animais em sistema de confinamento apresentam características positivas sob o ponto de vista econômico e operacional, entretanto, merecem especial atenção para que seus efeitos não se transformem em prejuízo, principalmente em se tratando do ambiente.

Na criação de bovinos de leite em condições de confinamento, a geração de dejetos é grande e deve se levar em consideração que, na maioria das vezes, a área utilizada é reduzida para dispor esse material (GONÇALVES JUNIOR et al., 2007).

Assim, tornando-se uma forma de exploração concentradora de dejetos animais, sabidamente possuidores de alta carga poluidora para o solo, ar e água. Por isso, muita atenção passou a ser dada às necessidades de desenvolvimento tecnológico, com vistas à disposição dos resíduos gerados por animais de forma a causar o mínimo impacto sobre o ambiente (MATOS, 2010).

Os dejetos de animais, especialmente quando acumulados em pilhas, podem ser habitat possibilitando a proliferação de bactérias, fungos, vírus, protozoários, moscas, mosquitos, baratas e ratos. Estercos animais podem conter  $10^{10}$  micro-organismos/g, dos quais  $10^9$  micro-organismos/g são anaeróbios (MATOS, 2010).

As moscas domésticas (*Musca domestica*) e varejeiras (*Chrysomya* spp.) são vetores da febre tifoide, disenteria, poliomielite, entre outras doenças. As moscas domésticas, em condições normais de vida, podem transmitir agentes patogênicos como vírus, rickettsias, protozoários, bactérias e helmintos, sejam como hospedeiro intermediário ou, principalmente, transportadores mecânicos. A mastite também pode ser

transmitida pelas moscas, causando queda na produção e qualidade do leite (QUADROS, 2009).

Segundo Matos (2010), os dejetos têm grande valor fertilizante em sua constituição, apresentam grande quantidade de macro e micronutrientes e devem ser aproveitados em cultivos agrícolas. Entretanto, quando a aplicação é feita sem que se utilizem critérios técnicos, haverá riscos de salinização do solo ou, em regiões de solo mais impermeável e, ou maiores índices pluviométricos, de poluição de águas superficiais e subterrâneas. E ainda, os dejetos possuem grande demanda bioquímica de oxigênio (DBO), o que pode representar grande impacto ambiental na qualidade das águas, se lançados em corpos hídricos receptores.

## **2.2 Agroindústria láctea**

Agroindústria é a espécie de agronegócio que transforma o produto *in natura* e o comercializa pronto para o consumo. Ela agrega valor e gera mais lucro ao produtor rural, só que requer sofisticação e empreendimento. A agroindústria deve estar conectada às tecnologias e deve cumprir os ditames referentes às questões sociais e ambientais (MANIGLIA, 2009).

Segundo Ferreira (2012), a cadeia agroindustrial do leite está presente em todo território nacional e é reconhecida como uma das mais importantes do agronegócio nacional sob a ótica social e econômica, com papel relevante no suprimento de alimentos, geração de empregos e de renda para a população.

O setor de laticínios caracteriza-se pela grande diversidade de produtos finais, tais como preparação do leite e fabricação de produtos derivados como queijos, iogurtes, leite em pó e longa vida. Para o processo de desenvolvimento rural a agroindústria de laticínios pode consolidar, efetivamente, como um dos importantes instrumentos, principalmente se o valor agregado ao produto for apropriado pelos produtores, seja por meio de associações ou cooperativas. (VALENTE JUNIOR, 2009).

O leite é um alimento natural considerado completo por ter na sua composição macro e micronutrientes, assim o setor de processamento de derivados do leite é uma das principais atividades industriais da agroindústria brasileira (JERÔNIMO, et al. 2012).

Aproximadamente 12% do leite são formados por substâncias sólidas: proteína, gordura, lactose e minerais, sendo água os 88% restantes. São os sólidos, principalmente a proteína, que fazem do leite um produto nobre, com alto valor nutritivo, e que servem de matéria prima para a elaboração dos diferentes produtos lácteos (VERNEQUE et al., 2006).

O setor láctico é de suma importância para indústria alimentícia, assim a geração de efluente e seu potencial poluidor nas águas receptoras são expressivos, sendo indispensável e obrigatório o tratamento desses efluentes antes de serem lançados no curso d'água (NIRENBERG e FERREIRA, 2005).

### **2.3 Geração e poluição de resíduos líquidos da agroindústria láctea**

Bley Junior et al. (2009), citam que desde os produtores até os laticínios, gera-se quantidade expressiva de efluentes e resíduos orgânicos. Regulados por legislações e normas ambientais específicas, o atendimento a essas exigências legais demanda investimentos estruturais de grande monta relativamente aos recursos que dispõe a economia setorial. Por falta de equipamentos de tratamento sanitário, esses efluentes quase sempre são lançados no ambiente e atingem as redes hídricas ainda carregadas de substâncias contaminantes.

As indústrias alimentícias, nas quais os laticínios se enquadram, tanto para o processo industrial como para lavagem de pisos e equipamentos requerem grande quantidade de água. Assim geram águas residuais caracterizadas por elevada carga orgânica contendo lipídios, proteínas, carboidratos e concentração de sólidos em suspensão. Porém essas características são variáveis de acordo com o tipo de processo adotado (MENDES et al, 2006).

O processo de industrialização de produtos de produtos de laticínios implica em impactos negativos ao ambiente devido à geração de resíduos sólidos, emissões atmosféricas, e principalmente, pela geração de efluentes líquidos, o que torna necessário o tratamento e disposição adequada para atender a legislação vigente e minimizar o impacto ambiental do setor (FEAM, 2011).

Nas unidades exclusivas de pasteurização do leite, as etapas de processamento são: recepção do leite, seguida de homogeneização, tratamento térmico, separação de creme e manteiga e acondicionamento do produto em embalagens adequadas.

Nessas unidades, são geradas águas residuais resultantes das lavagens de equipamentos e da limpeza de áreas de processamento. Geram-se entre 0,5 e 3L de água residuária para cada litro de leite processado, sendo esse efluente constituído por leite processado, bem como de águas de lavagem de equipamentos e instalações. A demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_5$ ) dessas águas residuais está entre 700 e 1.200  $mg L^{-1}$ , sendo estas ricas em sólidos dissolvidos totais (SDT) e óleos, mas pobres em sólidos em suspensão (SST) (MATOS, 2010).

No mesmo contexto, Matos (2010) ainda afirma que nas unidades de produção de lácteos processados, após a pasteurização do leite, podem ocorrer as seguintes etapas: separação do creme, produção de queijo, manteiga, bebida láctea, leite condensado, leite em pó, requeijão, iogurte, etc. As águas residuais de laticínios provenientes de todo processo de produção e limpeza geralmente estão contaminadas com soluções alcalinas, ácidas e desinfetantes; no resfriamento e condensação, apresentam normalmente baixa contaminação; e nas águas de processo, contaminadas por leite integral ou processado e, ainda, por componentes de leite (soro).

A geração de soro de uma empresa láctea varia proporcionalmente com sua produção, um quilograma de queijo em média gera como subproduto um volume de 9L de soro (JERÔNIMO et al, 2012). No processo do leite para pasteurização há especificidade de impactos por precisão de fonte de calor. Onde caldeiras são acionadas provocando emissões atmosféricas provenientes da queima de combustíveis que ainda podem gerar resíduos (cinzas).

De acordo com Barbosa et al. (2010), cerca de 85 a 95% do volume de leite utilizado na fabricação de queijos resultam em soro, ou seja, dez litros de leite produzem, aproximadamente, um quilograma de queijo e nove litros de soro, o qual contém aproximadamente metade dos sólidos do leite. Segundo Maganha (2008), o soro quando descartado afeta significativamente a qualidade dos efluentes das indústrias que não estão adaptadas à sua recuperação.

As perdas de leite e soro bruto além de resultarem em perdas de produtividade, são expressivas contribuições para a carga poluidora do efluente final. Um litro de leite integral equivale aproximadamente a uma  $DBO_5$  de 110.000 $mg/L^{-1}$  e a uma DQO de 210.000 $mg/litro$ . Dentre os diferentes processos de produção, as principais perdas são durante as operações de limpeza. Considera-se relevante as perdas por derramamento

de moldes e os causados por vazamentos no tanque de estocagem, durante o armazenamento e os por problemas de embalagens danificadas (MAGANHA, 2008).

Dragone et al. (2011), também afirmam que a causa principal da elevada DBO do soro de leite é pela presença de lactose no meio, dado que a separação de proteínas do soro diminui sua DBO em apenas 10.000 mg O<sub>2</sub>/L<sup>-1</sup>. Entretanto, a bioconversão da lactose do soro em proteína microbiana, etanol ou metanol por exemplo, permite reduzir a DBO deste subproduto em mais de 75%.

De acordo com Silva (2011), o soro é aproximadamente cem vezes mais poluente que o esgoto doméstico. O soro e o leiteiro, subproduto resultante do processo de fabricação da manteiga, pelos seus valores nutritivos e pelas suas elevadas cargas orgânicas, não devem ser misturados aos demais efluentes da indústria. E sim captados e conduzidos separadamente, de modo a viabilizar o seu aproveitamento na fabricação de outros produtos lácteos ou para utilização direta, com ou sem beneficiamento industrial, na alimentação de animais.

O volume e a carga poluente das águas residuária variam bastante, conforme, a água utilizada, o tipo de processo e o controle exercido sobre as várias descargas de resíduos, no geral, são constituídos por quantidades variáveis de leite diluído e materiais de sólidos suspensos (NIRENBERG e FERREIRA, 2005).

Dentre outros as águas residuais de laticínios, por possuir uma grande quantidade de nutrientes minerais dissolvidos quando eliminadas em mananciais hídricos, encontram-se dentre as pesquisas direcionadas que visam minimizar o avanço das constantes agressões ao meio ambiente (SILVA et al, 2013)

Maganha (2008) caracteriza os efluentes dos laticínios que normalmente apresentam os seguintes parâmetros: altos teores de óleos e graxas devido à gordura do leite; altos teores de nitrogênio e fósforo, principalmente em função do uso de produtos para limpeza e desinfecção; presença de sólidos suspensos, matéria orgânica expressa como DBO e DQO; odor originado pela decomposição da caseína; pH praticamente neutro, mas tende a acidificar devido ao uso de ácido na limpeza Clean in Place (CIP) e à fermentação láctea dos resíduos e sua posterior conversão em ácido lático e alta condutividade, especialmente na produção de queijos devido ao resíduo de cloreto de sódio da salga.

A matéria orgânica traduzida em demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio, pH, gordura, fosfatos, dentre outros materiais poluentes

que compõe os efluentes lácticos, potencializa a necessidade de tratamento prévio, pois se inseridos nos corpos receptores degradam e prejudicam o meio e a saúde animal (NIRENBERG e FERREIRA, 2005).

Os problemas de poluição em relação aos rios são gravíssimos porque suas águas se deslocam desaguando em rios maiores, levando os elementos poluentes a centenas ou milhares de quilômetros do local de origem onde foram jogados, poluindo assim em grandes distâncias, e muitas vezes a poluição chega ao mar, já que as grandes bacias hidrográficas terminam no oceano (SOUZA, 2009).

De acordo com autor supracitado, em relação aos lagos e pântanos de água doce o problema é mais crítico ainda, pois esses ecossistemas formam habitats fechados, de modo que a poluição contínua vai se acumulando até chegar ao extermínio da vida, porque não há possibilidade de recuperação em grande escala. São nesses ecossistemas isolados que são encontradas endemismo, ou seja, espécies encontradas só naquele local, aumentando a importância da manutenção do ambiente.

Caracterizado pelo grande volume de água que consome por dia no processo de limpeza e operações para o processamento, a industriais de lácteos geram grande vazão de efluentes (SILVA e EYNG, 2012).

A água empregada na fabricação de produtos lácteos caracteriza a indústria de laticínios como um das principais geradores de efluentes. A água pode ser utilizada em diferentes formas, como: incorporação ao produto, limpezas de máquinas, tubulações e pisos, águas de sistema de resfriamento e geradores de vapor, águas utilizadas diretamente nas etapas do processo industrial ou incorporadas aos produtos e esgotos sanitários gerados pela empresa (BEGNINI e RIBEIRO, 2014). O elevado volume de efluente procedente do processo de limpeza pode atingir a produção de 10 L de efluente por litro de leite processado (BRIÃO e TAVARES, 2012).

Nesse cenário, Silva e Eyng (2013) citam que algumas indústrias adotam como mecanismo o sistema convencional de lagoas. Todos os resíduos gerados na indústria de laticínios são direcionados para uma estação de tratamento de efluentes (ETE), sendo que na cadeia de processos têm-se pontos críticos com maior volume de efluentes, evidenciados nas etapas descritas a seguir:

- resíduos com elevada carga orgânica nos concentrados de leite na lavagem dos caminhões tanque;
- soluções ácidas e alcalinas utilizadas no processo de pasteurização do leite;

- volume de água utilizado para remoção de resíduos ricos em matérias orgânicas, em coágulos de queijo e soro, resultante da etapa de coagulação, corte, homogeneização e drenagem;
- limpeza rigorosa de todos equipamentos e piso da sala de produção realizada ao final da jornada de trabalho, estes contém resíduos ricos em coágulos e sólidos de queijo, aliados a detergentes e desinfetantes.
- O principal componente poluidor é a água residuária do processamento, contudo, existem diferenças na composição desta, em relação à matéria prima utilizada.

Os três principais agentes poluidores resultantes do processamento de produtos animais são: concentrações elevadas de matéria orgânica, particularmente gorduras, óleos, proteínas e hidratos de carbono - conduzindo a grandes necessidades de oxigênio biológico para o desdobramento destes compostos nos sistemas aquáticos; elevado conteúdo de partículas orgânicas e inorgânicas insolúveis – grandes cargas de sólidos em suspensão (GALVÃO et al., 2013).

O efluente é o principal impacto ambiental do setor pela qualidade e quantidade que são gerados, uma vez que pode-se considerar a geração de 1 a 6 litros de despejos para cada litro de leite processado. Normalmente, os pontos de geração de efluentes são: lavagem e limpeza de produtos remanescentes em caminhões, máquinas e equipamentos diretamente envolvidos na produção, derramamentos, vazamentos, operações deficientes de equipamentos e transbordamento de tanques, perdas no processo, tais como em operações de “partida” e de “parada” do pasteurizador e extravasamento dos produtos, arraste de produtos na evaporação (leite condensado e em pó) e aqueles resultantes do acerto das acondicionadoras, no início do processo de embalagem e ainda quando há descarte de produtos, tais como: soro (MAGANHA, 2006).

A descarga de efluentes, com tratamento insuficiente em corpos de água receptores, pode resultar em severos problemas ambientais, deterioração dos meios naturais e morte da fauna de rios e lagos (KUMMER et al, 2011). Tal fenômeno aponta para a necessidade de se encontrar mecanismos de tratamento que levem, não somente à redução desses resíduos, como também à devolução de uma água mais pura ao meio ambiente (SILVA e EYANG, 2013 a).

Para que haja produção sustentável é necessário a implementação de sistemas de tratamento de efluentes otimizados e integrados nos pontos considerados

categoricos de geração de resíduos líquidos do processo produtivo e de limpeza, uma vez que tais processos caracterizam-se pelo alto consumo de água, tendo a geração de vazões elevadas de efluentes (1,1 a 6,8 m<sup>3</sup> leite processado) (SARAIVA, et al. 2009).

Jeronimo et al. (2012) visitaram empresas lácticas e constataram que a grande maioria apesar de quantificarem a água de lavagem (lavagem de equipamentos e pisos, quebra de embalagens contendo leite e perdas nas maquinas), nenhuma destina essa água a um sistema de tratamento antes da disposição ao meio ambiente.

Com atenção a poluição hídrica busca-se diversas soluções para o tratamento do grande volume e da alta carga poluidora de efluentes lácticos (BRIÃO et al., 2015). Diante deste cenário, pode-se observar que o leite, entre outras matérias primas, destaca-se no setor alimentício e através da busca por melhor produtividade o crescimento da sua produção cada vez mais resulta na concentração de dejetos, que se dispostos de forma inapropriada causam problemas ambientais.

Buscam-se soluções para reduzir os impactos resultantes desta produção e nesse contexto uma alternativa plausível é a biodigestão, gerando produtos (biogás e biofertilizante) que podem ser utilizados no próprio sistema de produção, obtendo-se renda e economia de recursos (BLANCO, et al., 2014).

## **2.4 Biodigestores**

O biodigestor é uma câmara hermeticamente fechada com ausência de oxigênio onde se processa a decomposição e fermentação bacteriana de matéria orgânica, cujos agentes são bactérias anaeróbias que são encontradas em ambientes ricos em matéria orgânica, como pântano, esterco de animais, acúmulo de vegetais, em aterros sanitários. Assim, o biodigestor é considerado um simulador destes ambientes naturais, onde se permite o desenvolvimento de atividade vital dos micro-organismos anaeróbios (PAULA, 2010).

Paula (2010) também afirma que o material orgânico poluente, após passar pelo processo de digestão no biodigestor, sai purificado, isto é, a matéria orgânica sofre um serie de transformações, através do processo bioquímico provocado pelas ações de bactérias. O resultado da via metabólica é que provoca uma série de reações químicas em cadeia, que por fim resultam na produção de gases, principalmente metano (CH<sub>4</sub>) e o gás carbônico (CO<sub>2</sub>). E ainda mais, este processo bioquímico de fermentação

provoca a destruição dos patógenos contidos nos dejetos, tais como, ameiba, ovos de *Shistosoma*, *Ancilostomo*, de *Ascaris lumbricoides*, de *Oxiuris*, além de bactérias e fungos nocivos à saúde humana.

Existem vários tipos de biodigestores que apresentam vantagens e desvantagens, mas todos eles visam, basicamente, criar condição anaeróbia, isto é, total ausência de oxigênio na biomassa a ser digerida. Qualquer modelo de biodigestor construído se for corretamente instalado e operado, dará uma boa produção de biogás. A escolha de determinado modelo se dá em função das condições locais, disponibilidade de substrato, experiência, conhecimento do construtor, investimento envolvido, etc., (NOGUEIRA, 1986).

Os modelos de biodigestores batelada são abastecidos uma única vez e mantidos fechados por um período apropriado, para a matéria orgânica ser fermentada e posteriormente descarregada. Este modelo, apesar da simplicidade, pode ser útil em situações em que o resíduo é obtido periodicamente, como é o caso da cama obtida nos galpões de frangos de corte (LUCAS JÚNIOR, 1995).

Nos biodigestores contínuos, o abastecimento é realizado todos os dias, portanto, os resíduos são produzidos e coletados diariamente. A carga diária corresponde a uma carga de volume semelhante de material fermentado. A biomassa no interior do biodigestor se movimenta por diferença hidráulica, entre a entrada do substrato e a saída do biofertilizante no momento do carregamento. Cada carga requer um tempo de retenção, geralmente entre 30 e 50 dias, dependendo da variação de temperatura do meio onde está localizado o biodigestor (MIRANDA, 2009).

## **2.5 Processo de biodigestão anaeróbia**

De maneira geral, os tratamentos de resíduos utilizam processos físicos (separação da fase sólida, adsorção, separação por *stripping*, concentração via evaporação, filtração por membranas em osmose reversa), processos químicos (floculação e precipitação) e processos biológicos (anaeróbios com produção de metano, aeróbio com aumento de temperatura, desinfecção, nitrificação, desnitrificação para remoção de nutrientes) para transformação e remoção da carga poluente presente no efluente (SEGANFREDO, 2007).

A digestão anaeróbia é um processo biológico complexo onde diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos assimilam e destroem a matéria orgânica. Esse processo de digestão ocorre na ausência de oxigênio molecular, promove a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples como metano e gás carbônico. Para que essa transformação ocorra, distinguem-se três fases principais no processo global da conversão da matéria orgânica: hidrólise, acidogênese e metanogênese (CASSINI, 2003).

Na digestão anaeróbia ocorrem diversos processos que juntos resultam na decomposição da matéria. A primeira fase é a liquefação ou hidrólise, onde o material orgânico complexo é transformado em compostos dissolvidos ou matéria orgânica volátil; a segunda fase é a gaseificação que pode ser subdividida em duas fases fermentação ácida ou acidogênese, onde os compostos são transformados em ácidos orgânicos voláteis (fórmico, acético, propiônico, butírico e valérico), e a fermentação acetogênica ou acetogênese, onde os produtos da subfase anterior são transformados em acetato, hidrogênio e monóxido de carbono; a terceira e última fase é a metanogênese, onde os produtos da acetogênese são transformados, principalmente em metano ( $\text{CH}_4$ ), embora também sejam gerados outros gases (FARIA, 2008)

O sucesso do processo de biodigestão anaeróbia está ligado à sequência bioquímica de transformações metabólicas e é influenciado por uma série de fatores que podem interferir no processo (MIRANDA, 2009). De acordo com Arruda (2002), as condições necessárias para uma fermentação ótima dependem dos seguintes fatores:

- Impermeabilidade ao ar: o biodigestor deve ser perfeitamente vedado já que os micro-organismos envolvidos no processo não exigem oxigênio e assim a produção de metano não é inibida.
- Temperatura adequada: em torno de  $30^\circ\text{C}$ , qualquer mudança brusca que exceda afeta a produção.
- Nutrientes essenciais: nitrogênio, sais orgânicos e principalmente carbono. Sendo, a relação Carbono/Nitrogênio (C/N) ideal entre 20:1 e 30:1.
- Teor de água: situar normalmente em torno de 90% do peso conteúdo total (1:1 ou 1:1,5). Tanto o excesso quanto a falta são prejudiciais.
- Substâncias prejudiciais: NaCl, Cu, Cr,  $\text{NH}_3$ , K, Mg, Ni são elementos que devem ser mantidos em baixas concentrações.

- Tempo de retenção: 35 a 45 dias em geral.

## 2.6 Produtos gerados a partir da biodigestão anaeróbia

Os produtos gerados a partir da biodigestão anaeróbia são o biogás e o biofertilizante. (CASSINI, 2003).

De acordo com Pereira (1986), biofertilizante é o material retirado do biodigestor após ter sofrido o processo de transformação anaeróbia. A utilização como fertilizante é de grande importância pelos resultados obtidos na melhoria do solo, ou seja, maior retenção da capacidade de umidade, modificação na estrutura, principalmente em terrenos argilosos, com maior penetração do ar, proliferação de bactérias, aumentando a decomposição dos elementos nutritivos assimiláveis pelas plantas e introdução de micronutrientes necessários ao desenvolvimento dos vegetais.

A Embrapa (2006) define biofertilizante como: bio quer dizer vida e fertilizante significa adubo, que contém organismos vivos que auxiliam no controle de doenças e também minerais que irão nutrir as plantas. Os biofertilizantes podem ser feitos com qualquer tipo de matéria orgânica fresca (fonte de organismos fermentadores). O esterco bovino apresenta mais fácil fermentação e já vem inoculado com bactérias decompositoras muito eficientes.

A mesma entidade afirma que é possível utilizar produtos para aumentar a velocidade no processo de fermentação, ou seja, produtos que vão servir de alimentos para bactérias que farão a decomposição da matéria orgânica. Tais produtos são chamados de catalisadores, por exemplo: soro de leite, caldo de cana de açúcar e melão.

Ao passar pelo biodigestor, segundo Kunz et al. (2005), o efluente perde carbono na forma de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (diminuição na relação C/N da matéria orgânica), o que melhora as condições do material para fins agrícolas em função do aumento da mineralização de alguns nutrientes.

Barreira (2011) afirma que o consumo de fertilizantes minerais químicos tem duplicado ano a ano no Brasil em função da expansão da fronteira agrícola. Sua substituição, ao menos em grande parte pelo biofertilizante, permitiria a redução drástica com relação a dependência agrícola do petróleo. Estima-se que, se apenas o esterco de fêmeas do rebanho bovino brasileiro fosse processado em biodigestores, o país

poderia produzir algo em torno de 6 mil toneladas diárias de biofertilizante. Em algumas regiões do Brasil, agricultores que construíram biodigestores em suas propriedades já começaram a comercializar biofertilizante ao preço do fertilizante mineral químico, representando isto uma importante fonte de renda alternativa para o proprietário.

O biogás pode ser produzido a partir de quase todos os tipos de matéria-prima biológica, bem como dos setores agrícolas primários e de vários fluxos de resíduos orgânicos provenientes da sociedade em geral (VIDAL, 2013). Na geração do biogás, a degradação anaeróbia converte os compostos orgânicos em novas células bacterianas e em vários compostos que juntos formam o biogás (CASSINI, 2003).

A obtenção de energia utilizável a partir da biomassa envolve processos físicos e químicos ou processos de conversão bioquímica através da ação de micro-organismos, o biogás quando apresenta maior teor de metano em sua composição, pode ser aplicado como combustível. (CORTEZ et al., 2008). Assim, em termos energéticos quanto maior for o seu percentual de metano, melhor será a transmissão da energia (MORGAN, 2010).

Biogás, ou gás metano, é um gás incolor, altamente combustível, que produz chama azul-clara e queima com um mínimo de poluição. É uma mistura gasosa combustível, de alto poder calorífico, composta basicamente de dois gases, o metano ( $\text{CH}_4$ ), que representa 60- 70% da mistura, e o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) que representa os 40-30% restantes. Outros gases (nitrogênio, N; hidrogênio, H e gás sulfídrico,  $\text{H}_2\text{S}$ ) participam da mistura em proporções menores. A qualidade do biogás é proporcional a percentagem de metano da mistura, assim quanto maior for a percentagem de metano, melhor será o biogás (COMASTRI FILHO 1981).

Na China, antes da difusão do biogás, na zona rural e periferia dos centros urbanos, o comparecimento das pessoas ao trabalho era de 60%, devido à parasitoses e infecções intestinais, decorrentes da contaminação da água, solo e das hortaliças, por esgoto doméstico e esterco de animais. Com a difusão dos biodigestores para produção do biogás que utiliza todo o tipo de material orgânico para produzi-lo, o comparecimento da população ao trabalho subiu para 95% em virtude de possuir boa saúde, resultante da ausência de poluição ambiental (PAULA, 2010).

Assim, Paula (2010) salienta que além de evitar a contaminação do solo e da água, há outros benefícios da implantação de biodigestores como a geração de biofertilizante, cuja eficiência aumenta a produtividade agrícola em até 30%; contribui,

substancialmente, para a diminuição dos custos agrícolas; melhora o padrão de saúde da população; reduz os desmatamentos para obtenção de lenha destinada aos fogões; gera energia elétrica; permite a implantação de frotas de veículos movidas a biogás; mantém as cozinhas limpas, livres de fuligem e fumaças; alimenta lampião, geladeira e moto-bomba; De modo geral, o biogás é um aliado contra a poluição, gera benefício ambiental, traz no seu bojo a melhoria da qualidade de vida, que é o desiderato da Agenda 21.

Quadros (2009) cita os benefícios do uso de biodigestores para geração do biogás: alta relação benefício/custo (2 a 3 anos para retorno do investimento e benefício estimado em 10 anos); fonte de energia renovável e limpa; melhora as condições de higiene para os animais e pessoas; reduz emissão de gases do efeito estufa (GEE), gerando créditos de carbono; preserva da flora e fauna – o biogás, como substituinte da lenha reduz o corte de árvores; gera economia de gás de cozinha (gás liquefeito do petróleo (GLP)), óleo diesel e lenha, além da redução na demanda da produção e distribuição da energia elétrica e permite o máximo aproveitamento dos recursos locais e a integração das atividades rurais.

O biogás por apresentar alta porcentagem de metano, é extremamente inflamável, podendo ser empregado em todas as funções termodinâmicas: geração de frio, calor e potência. No meio rural, o biogás é utilizado para cocção, iluminação, refrigeração doméstica, aquecimento, acionamento de motores a explosão e aqueles usados para a irrigação e geração de energia elétrica (CORTEZ et al., 2008).

As fontes de energia renováveis vieram para apoiar como excelentes instrumentos na luta contra o aquecimento global. O biogás tem grande destaque por sua viabilidade de produção e também pelo fato da tecnologia para sua produção já ser dominada por vários países, incluindo o Brasil. Um dos maiores problemas para tornar a produção do biogás mais viável ainda é o petróleo, bem como seus derivados. Isso acontece porque a lucratividade com a produção de petróleo é muito maior do que a da produção do biogás e de outras fontes de energia renováveis exploradas (ROYA et al., 2011).

A quantidade de energia interna contida no combustível é definida como poder calorífico sendo que quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida (SOUZA, 2012). De acordo com Pecora et al. (2008), o aspecto físico e químico do biogás influenciará no seu próprio poder calorífico, ou seja, a umidade presente no biogás influencia diretamente o processo de combustão (diminui o poder calorífico) e

quanto maior a quantidade de metano, maior o poder calorífico do biogás (o CO<sub>2</sub> é a forma mais oxidada do carbono, não podendo ser mais queimado).

De acordo com Nogueira (1986), o poder calorífico do biogás obviamente dependerá do seu teor de metano e grau de umidade. O gás contém grande quantidade de água, pois a digestão se dá ao meio úmido e satura de vapor d'água o biogás produzido. O poder calorífico do biogás, saturado de água (umidade relativa 100%), a 15°C e 150 mm de coluna d'água de pressão, pode ser relacionado ao seu teor de metano, pela equação: Poder calorífico = 90,67% x % CH<sub>4</sub> [kcal/m<sup>3</sup>].

O valor frequentemente adotado para o poder calorífico é 5500 kcal/ m<sup>3</sup>. Se o gás é desumidificado, o poder calorífico aumenta, e se o dióxido de carbono é removido, por borbulhamento em solução alcalina, o seu valor aproxima-se do correspondente ao metano puro, 9000 kcal/ m<sup>3</sup> (NOGUEIRA, 1986).

Barreira (2011) afirma que a porcentagem de metano que confere ao biogás um alto poder calorífico, varia entre 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esta variação decorre de sua maior ou menor pureza, ou seja, maior ou menor quantidade de metano. O biogás altamente purificado pode alcançar até 12.000 kcal por metro cúbico.

O biogás pode ser aproveitado pelo seu potencial energético por intermédio da queima e obtenção de energia térmica. A geração do biogás traz aos produtores uma opção energética renovável e limpa de ótimo rendimento com diminuição do custo de energia elétrica de suas propriedades, proporcionando o desenvolvimento econômico e a melhoria do setor energético local e brasileiro e distribuição correta dos efluentes gerados em suas propriedades (SANTOS e NARDI JÚNIOR, 2013).

## **2.7 Processo de co-digestão**

As fontes renováveis e limpas surgem como maneira para reverter, controlar e mitigar os problemas causados pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) que estão modificando as propriedades físico-químicas da atmosfera e comprometendo o equilíbrio natural da biosfera e da qualidade de vida no Planeta (BLANCO et al., 2014).

A digestão anaeróbia é considerada um tratamento eficiente de resíduos orgânicos, ressaltante ao fato do processo transformar resíduos em biogás, uma fonte de energia renovável de baixo custo. Diante desta vantagem, vários estudos têm foco

para desenvolver métodos que visam melhorar o desempenho, bem como, a eficiência do processo (ESPOSITO et al., 2012).

Os substratos utilizados para o abastecimento de biodigestores atendem vários tipos de biomassa constituídos de carboidratos, proteínas, lipídios, celulose e hemicelulose, tendo os dejetos animais, resíduos sólidos de colheita, os resíduos orgânicos agroindustriais (abatedouro e lácteos), resíduos orgânicos de mercados e residenciais e ainda culturas energéticas como exemplos adequados para substratos na produção de biogás (ESPOSITO et al., 2012).

De acordo com autores supracitados o teor de hidratos de carbono, proteínas e lipídios que compõem o substrato influenciam na taxa de produção de biogás. Lipídios proporciona rendimento mais elevado, porém exige tempo de retenção longo devido a sua biodegradabilidade ser lenta, ao contrário dos hidratos de carbono e proteínas que tem taxas de conversão mais rápidas, mas rendimento de biogás mais baixos. Fernandez et al. (2014) salienta que por meio de digestão anaeróbia os recursos poderiam ser recuperados para produzir biogás, contribuindo para reduzir a dependência a partir de combustíveis fósseis.

A co-digestão é o consórcio de um resíduo orgânico a outros resíduos que podem ser ricos em carboidratos ou micro-organismos, como caldo de cana, vinhaça, esterco bovino, galinha entre outros, este termo é usado para descrever o tratamento combinado de resíduos com várias características complementares, sendo uma das principais vantagens da tecnologia anaeróbia (FERNÁNDEZ 2005, apud NOGUEIRA, 2013).

O processo de co-digestão (quando dois ou mais tipos de resíduos compõem o substrato) exerce influência fundamental no processo de digestão, por propiciar o equilíbrio da relação C/N, melhorar a estrutura física do substrato, a densidade microbiana, o percentual de umidade, e ainda incorporar diversos outros tipos de agentes tamponantes, favorecendo a redução significativa do tempo de retenção de sólidos (LEITE, 2005).

A técnica de co-digestão permite a utilização de instalação existente, aumentando a produção de biogás e da energia produzido nas unidades de cogeração, com isso não se tem custo com novas instalações (GÓMEZ et al. 2006).

O principal efeito benéfico da co-digestão está no aumento do potencial do biogás quando a combinação de resíduos orgânicos utilizados são ricos em

nutrientes que otimizam e equilibra o processo (ESPOSITO, 2012). Comino et al. (2012), ao avaliar co-digestão de dejetos bovinos com proporções de 20%, 35%, 50% e 65% de soro de leite em reatores, observaram que o alto volume de soro de leite (até 65% em volume) é passível de ser utilizado sem adição de produtos químicos para correção de pH produzindo biogás com concentração de metano com cerca de 55%.

Villela e Silveira (2005), ao analisar na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de um Laticínio a produção de biogás gerado por efluentes do processo de pasteurização do leite, iogurtes com polpa de frutas, flan, pudins e produtos longa vida, para futuramente ser utilizado como insumo energético para o próprio processo industrial, por meio do uso de biodigestor modelo Chinês, verificaram biogás com a seguinte composição: 62,7 % de CH<sub>4</sub>; 13,4 % de N<sub>2</sub>; 5 % de CO; 2,4 % de CO<sub>2</sub>; 2,4 % de H<sub>2</sub>O; 14,1 % de H<sub>2</sub>S.

Wu (2000) descreve que a co-digestão é a digestão simultânea de uma mistura homogênea de dois ou mais substratos que melhora os rendimentos de biogás, devido a aspectos positivos estabelecidos no processo através do fornecimento de nutrientes em falta pelos co-substratos e ainda traz vantagens econômicas e ambientais para o tratamento de resíduos conjuntos.

Bertin et al. (2012), obtiveram resultados que demonstram que a adição de 50% de soro de queijo em relação ao volume do biodigestor proporciona rendimento mais elevado do que quando os dois resíduos são tratados separadamente. Além desse resultado, o estudo demonstra mais eficiência na co-digestão de soro de queijo e dejetos bovinos quando são submetidos ao sistema de duas fases, onde a primeira fase acidogênica é diretamente inserida na metanogênica, com ganho pouco maior na taxa de metano que pode ser devido ao melhor aproveitamento da utilização do hidrogênio produzido na fase acidogênica.

Rico et al. (2014), em pesquisa com co-digestão anaeróbia de água residuária de laticínios e esterco bovino concluíram que constitui bom substrato para o processo. Os resultados obtidos demonstraram que os resíduos líquidos e semi-líquidos da indústria de laticínios tiveram potenciais de metano equivalentes ao esterco e 35% desse resíduo láctico com base na massa aumentou 80,5% do rendimento de metano em relação ao esterco quando em digestão anaeróbia individual.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local do experimento e obtenção dos componentes do substrato**

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Biomassa I e II do Departamento de Engenharia Rural e os dejetos de bovinos leiteiros foram colhidos no confinamento do Setor de Bovinocultura do Departamento de Zootecnia, ambos situados na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista / UNESP – Câmpus de Jaboticabal, situado nas coordenadas geográficas: 21°14'05" S; 48°17'09" W e altitude média de 613,68 metros.

A água residuária de laticínio, utilizada durante todo experimento, foi disponibilizada por uma indústria láctea, localizada no município de Patrocínio Paulista- SP. O efluente era originário das atividades de recepção de leite, resfriamento e produção de produtos como: leite UHT – longa vida, leite pasteurizado, achocolatados, manteiga, requeijão, creme de leite, leite condensado e outros derivados. A Tabela 1 representa as características da água residuária (efluente bruto) utilizada nos períodos dos experimentos.

Tabela 1. Características da água residuária de laticínio utilizada nos períodos do segundo experimento, com biodigestores contínuos.

Ensaio	Efluente bruto		Unidade
	Período 1	Período 2	
	Resultado	Resultado	
DBO 5,20 C	2380	1188	mg O <sub>2</sub> /L <sup>-1</sup>
DQO	3960	2906	mg O <sub>2</sub> /L <sup>-1</sup>
Óleos e graxas	720	530	mg/L
Ph	11,11	5,41	
Sólidos sedimentáveis	0,9	0,7	mL/L
Sólidos Suspensos Totais	960	785	mL/L

Fonte: Laudo

A Usina de Laticínios Jussara S/A, possui Estação de Tratamento de Efluente (ETE) e efetua o tratamento correto de todo efluente gerado, o qual cumpre com as exigências legais. A água residuária foi colhida na ETE do Laticínio no ponto de Flotodecantação (Figura 1), onde é realizada a redução da concentração de gorduras. A quantidade total de água residuária foi dividida e as partes armazenadas em galões de 20 L e transportadas para o Laboratório de Biomassa I, onde a água residuária nos galões foram fracionadas em quantidades menores e alojadas no freezer, para que a mesma fosse congelada e não perdesse suas propriedades e pudesse ser utilizada na preparação dos substratos ao longo do mês.

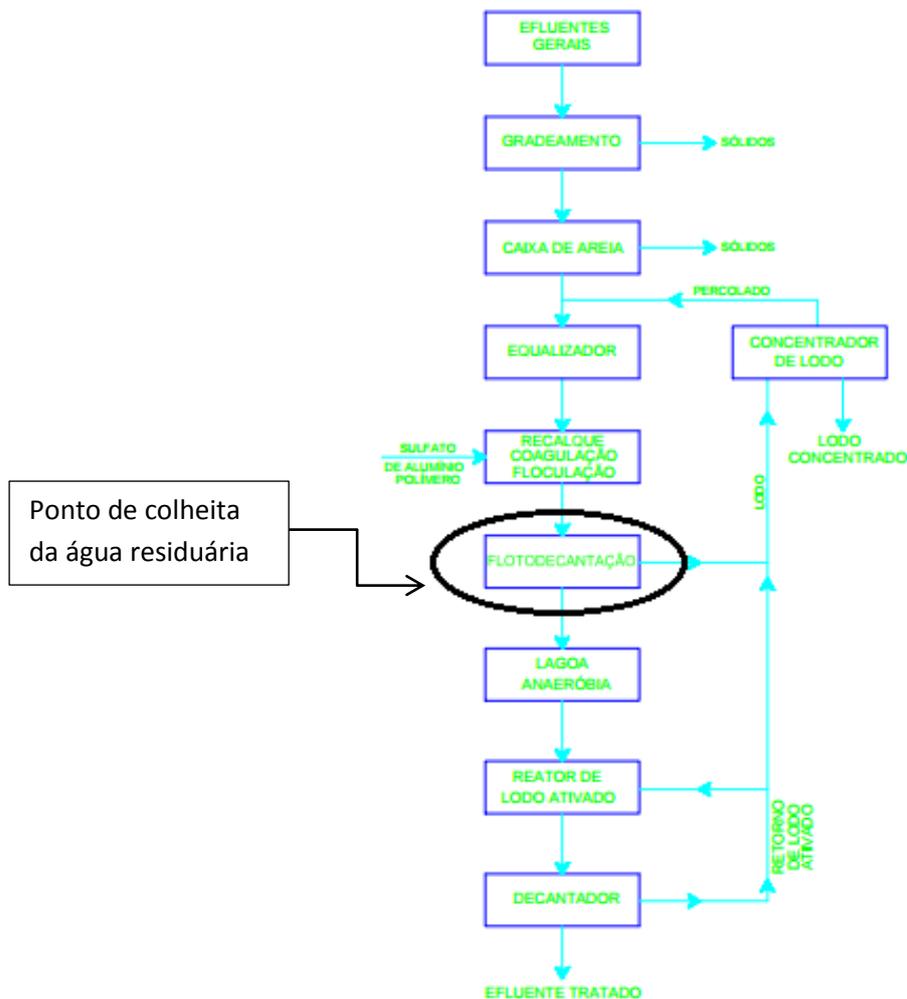


Figura 1: Fluxograma de tratamento de efluente e ponto de colheita

### 3.2 Descrição dos biodigestores

O experimento foi desenvolvido em duas fases. Na primeira, foram utilizados biodigestores com operação batelada (um único abastecimento) e a segunda com operação contínua (abastecimento diário).

Na primeira fase foram utilizados 20 biodigestores constituídos, basicamente, por três cilindros retos de PVC com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, acoplados sobre uma cap e caracterizados como biodigestores de bancada, com volume total de 2 litros cada. Os cilindros de 50 e 150 mm estão inseridos um no interior do outro, de tal forma que o espaço existente entre a parede externa do cilindro interior e a parede interna do cilindro exterior comporta um volume de água (“selo de água”), atingindo profundidade de 50 cm. O cilindro de diâmetro intermediário tem uma das extremidades

vedadas, conservando-se apenas uma abertura para descarga do biogás, e permanece inserido no selo de água, para propiciar condições anaeróbias e armazenar o gás produzido (Figura 2).



Figura 2: Visão interna do biodigestor batelada

Na segunda fase foram utilizados biodigestores tubulares de bancada com capacidade para 60 litros, construídos com tubo de PVC com diâmetro de 300 mm e com 1 m de comprimento, tendo suas extremidades vedadas por cap de fibra de vidro denominados de contínuos. Em uma das extremidades está acoplada um cano de entrada do afluente de 60 mm e na extremidade oposta um cano de 60 mm com registro de 75 mm para saída do efluente. Os gases gerados nos biodigestores foram armazenados em gasômetros de 250 mm de diâmetros e 60 cm de comprimento, ligados aos biodigestores por meio de mangueiras plásticas para condução do biogás (Figura 3).



Figura 3: Visão geral do biodigestor contínuo e do gasômetro

### 3.3 Ensaios de co-digestão

Na primeira fase os substratos da co-digestão anaeróbia dos biodigestores bateladas tiveram os resíduos (dejeito bovino leiteiro mais água residuária de laticínio e água), calculados em kg baseados na matéria seca do dejeito bovino leiteiro utilizado no experimento, considerou-se 8% de sólidos totais (ST). Com intuito de avaliar os efeitos da co-digestão da ARL compondo a maior parte em relação ao dejeito bovino na composição do substrato, o tratamento ARL foi elaborado. Todos os tratamentos tiveram carga total perfazendo 1,8 L da capacidade total de 2L de cada biodigestor. Para tanto, foram utilizados quatro biodigestores para cada tratamento. Os valores estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidades de substratos em kg adicionados aos biodigestores bateladas.

Tratamentos	Dejeito (kg)	Água residuária de laticínio (kg)	Água (kg)
0% ARL	0,890	-	0,910
50% ARL	0,890	0,455	0,455
77,5% ARL	0,890	0,705	0,205
100% ARL	0,890	0,910	-
ARL	0,200	1,600	-

A segunda fase, utilizou-se biodigestores contínuos com carga total de 60 L da capacidade total do biodigestor e 2 L de substrato para carga diária. Foi adotado a porcentagem de 50% de água residuária para compor o substrato do tratamento denominado COM ARL, após os resultados terem sido satisfatórios, essa fase foi subdividida contemplando o segundo período com a intenção de aumentar a porcentagem da água residuária na composição do substrato para o tratamento em co-digestão com dejetos bovinos, sendo cada período com dois tratamentos e cinco repetições. Na Tabela 3, estão apresentados os valores em kg dos resíduos que compuseram o substrato de carga diária (2 L) para o processo de co-digestão anaeróbia em biodigestores contínuos dos dois períodos.

Os períodos analisados foram de 30 dias de cada experimento, quando a produção de biogás estava estabilizada o que compreende do dia 24/03/2015 a 22/04/2015 denominado de primeiro período, os cálculos foram baseados na matéria seca do dejetos, sendo adotados 4% de ST.

T1 - Sem água residuária de laticínio (SEM ARL): dejetos + 100% água de torneira

T2 - Com água residuária de laticínio (COM ARL): dejetos bovinos + 50% água de torneira + 50% água residuária de laticínio

Segundo período, de 28/05/2015 a 26/06/2015, os cálculos foram baseados na matéria seca do dejetos, sendo adotados 8% de ST. As porcentagens da água residuária de laticínio foram calculadas com base ao volume da carga diária (2 L).

Para definir as proporções diária de cada resíduo que compôs os tratamentos para o abastecimento dos biodigestores simulou uma propriedade rural em sistema de confinamento com capacidade para confinar 1.000 vacas leiteiras e capacidade total de produção de leite de 30.000 L, sendo toda produção utilizada em um laticínio de pequeno porte pertencente a própria propriedade.

Matos (2010) afirma que a geração média das águas residuais em um laticínio é de 3 a 4 L<sup>-1</sup> de leite processado. Assim, para o cálculo da disponibilidade de água residuária proveniente da propriedade em questão adotou-se a quantia de 3,5 L de geração de água residuária de laticínio para cada litro de leite processado, assim:

Geração diária de água residuária: 3,5 L x 30000 = 105.000 litros de ARL/leite processado/1000 vacas.

Em relação ao estrume proveniente desse confinamento, adotou-se geração média diária de 30 kg/vaca e considerando-se que o teor médio de sólidos totais desse dejetos seja 16%, teríamos:

$$30.000 \times 0,16 = 4.800 \text{ kg/MS.}$$

Assim, ao ser utilizado uma parte de água limpa na lavagem do sistema obtém-se a proporção de: água limpa : estrume : água residuária

$$30.000 : 30.000 : 105.000, \text{ ou seja, } 1: 1: 3,5 = 5,5.$$

T1 - Sem água residuária de laticínio (SEM ARL): dejetos + 100% água de torneira

T2 - Com água residuária de laticínio (COM ARL): dejetos bovinos + 36,5 % água de torneira + 63,5% água residuária de laticínio.

Tabela 3. Quantidades de substratos em kg adicionados aos biodigestores contínuos diariamente.

Tratamentos	Dejeto (kg)	Água (kg)	Água residuária de laticínio (Kg)
Período 1			
SEM ARL	0,450	1,550	-
COM ARL	0,450	0,775	0,775
Período 2			
SEM ARL	0,363	1,633	-
COM ARL	0,363	0,363	1,270

Depois de calculadas as quantidades de dejetos bovinos, água, água residuária de laticínio, estes foram homogeneizados manualmente com auxílio de pás em baldes, a fim de propiciar melhores condições de fermentação. Esposito (2012), afirma que os resíduos sólidos que passam por processos mecânicos antes da co-digestão reduzem o tamanho de suas partículas, assim expõe maior área de superfície específica e a liberação intracelular de componentes sendo possível o aumento da taxa de degradação e aceleração do processo de digestão.

No momento do abastecimento e durante todo o processo de biodigestão foram colhidas amostras do afluente e do efluente (biofertilizante) de cada biodigestor, para análises de quantificação de Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV) e medição de pH. As produções de biogás foram quantificadas até que todos os biodigestores entraram em falência, ou seja, pararam de produzir biogás.

### 3.4 Análises realizadas

#### 3.4.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH foi medido com auxílio de um pHmetro digital “Digimed (DMPH-2)”, o potencial hidrogeniônico (pH), foi medido nas amostras recém coletadas do substrato de afluente e efluente destinados para análises de determinação dos teores de sólidos totais e voláteis.

#### 3.4.2 Temperatura ambiente

Antes da leitura diária do biogás, armazenado no gasômetro, era aferida a temperatura ambiente com auxílio de um termômetro digital (em °C).

#### 3.4.3 Teores de sólidos totais

Para determinação de sólidos totais, as amostras dos afluentes e efluentes foram acondicionadas em triplicata em recipientes de alumínio, previamente tarados e pesados para obtenção do peso úmido (Pu) do material em balança com precisão de 0,01g. Posteriormente, levados à estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 65°C até atingirem peso constante, após foram retirados da estufa para atingir temperatura ambiente foram novamente pesadas, obtendo-se então o peso seco (Ps). O teor de sólidos totais foi determinado semanalmente segundo metodologia descrita por APHA (2005). O teor de sólidos totais (ST), em porcentagem, foi determinado por meio da seguinte equação:

No qual:

$$ST = \left[ 1 - \left( \frac{Pu - Ps}{Pu} \right) \right] \times 100$$

ST = teor de ST, em porcentagem;

PU = peso úmido da amostra, em g;

PS = peso seco da amostra, em g.

### 3.4.4 Teores de sólidos voláteis

Para a determinação dos sólidos voláteis, o material seco em estufa, resultante da determinação dos sólidos totais, foi levado à mufla, em cadinhos de porcelana previamente tarados em balança analítica com precisão de 0,0001g, e mantidos a uma temperatura de 575° C por um período de 2 horas. Após o resfriamento em dessecadores, o material resultante foi pesado, obtendo-se o peso das cinzas ou matéria mineral. Os teores de sólidos voláteis serão determinados semanalmente e expressos em porcentagem de matéria seca segundo metodologia descrita por APHA (2005).

No qual:

$$SV = \left[ 1 - \left( \frac{Pf - T}{Pi - T} \right) \right] \times 100$$

sendo:

SV = teor de SV, em porcentagem;

Pi = peso inicial da amostra, em g;

Pf = peso obtido após queima em mufla, em g;

T = tara do cadinho, em g.

### 3.4.5 Determinação do volume de biogás e cálculo dos potenciais de produção de biogás

O volume de biogás produzido de cada biodigestor foi mensurado pela medição do deslocamento vertical dos gasômetros através de régua graduada, multiplicado o dado registrado pela área da seção transversal interna dos gasômetros. Após cada leitura, o registro de descarga de biogás era aberto até que os gasômetros fossem zerados e em seguida eram fechados. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20°C foi efetuada com base no trabalho de Caetano (1985), no qual verificou-se que, pelo fator de compressibilidade (Z), o biogás apresentou comportamento próximo ao ideal. Conforme descrito por Santos (2001), para a correção do volume de biogás, utilizou-se a expressão resultante da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac, onde:

$$\frac{V_0.P_0}{T_0} = \frac{V_1.P_1}{T_1}$$

Sendo que:

$V_0$  = volume de biogás corrigido,  $m^3$ ;

$P_0$  = pressão corrigida do biogás, 10322,72 mm de água;

$T_0$  = temperatura corrigida do biogás, 293,15 K;

$V_1$  = volume do gás no gasômetro;

$P_1$  = pressão do biogás no instante da leitura, 9652,10 mm de água;

$T_1$  = temperatura do biogás, em K, no instante da leitura.

Os potenciais de produção de biogás foram calculados utilizando-se os dados de produção diária e as quantidades de substrato de ST e SV adicionados nos biodigestores, além das quantidades de SV reduzidos durante o processo de biodigestão anaeróbia. Os valores são expressos em  $m^3$  de biogás por Kg de substrato, de dejetos ou de ST e SV.

#### **3.4.6 Mensuração de metano do biogás**

No período de execução do segundo experimento, ou seja, com biodigestores contínuos, foram feitas análises para determinação quantitativa de metano ( $CH_4$ ) presente nas amostras de biogás produzido, assim foram colhidas amostras de biogás, com auxílio de seringas e posteriormente injetadas em cromatógrafo gasoso Trace GC Ultra da Thermo Scientific.

#### **3.4.7 Digestão sulfúrica e determinação dos minerais**

Posteriormente a secagem em estufa a 65 °C, as amostras dos ensaios de biodigestão anaeróbia (afluentes e efluentes) foram trituradas em moinho de bola com câmara fechada. Em seguida realizou-se a digestão sulfúrica, a fim de avaliar a composição química referente à P e K. Para tanto, as amostras colhidas foram digeridas semanalmente utilizando-se o digestor Digesdahl Hach, que promove a digestão total da

matéria orgânica à base de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e Peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) a 50%. Com o extrato obtido desta digestão foi possível determinar os teores de Fósforo e Potássio segundo Bataglia et al. (1983).

O nitrogênio total foi determinado por meio da utilização do destilador de micro-Kjedahl, cujo princípio baseia-se na transformação do nitrogênio amoniacal ( $(NH_4)_2SO_4$ ) em amônia ( $NH_3$ ), a qual é fixada pelo ácido bórico e posteriormente titulada com  $H_2SO_4$  até nova formação de  $(NH_4)_2SO_4$ , na presença do indicador ácido/base, conforme metodologia descrita por Silva (1981).

Os teores de fósforo foram determinados pelo método colorimétrico utilizando-se espectrofotômetro HACH modelo DR-2000. O método baseia-se na formação de um composto amarelo do sistema vanadomolibdofosfórico em acidez de 0,2 a 1,6 N, onde a cor desenvolvida será medida em espectrofotômetro, determinando-se assim a concentração de fósforo das amostras, por meio de uma reta padrão traçada previamente a partir de concentrações conhecidas, entre 0 e 52  $\mu g$  de P/ml. Os padrões foram preparados conforme metodologia descrita por Malavolta (1991).

As concentrações de potássio foram determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica modelo GBC 932 AA.

### 3.5 Delineamento experimental

Para o experimento relativo aos biodigestores batelada as variáveis de potencial de produção de biogás e produção total de biogás utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco tratamentos e quatro repetições. Para o experimento utilizando os biodigestores contínuos durante o primeiro período e segundo período as variáveis de potencial de produção de biogás e produção total de biogás utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco repetições e dois tratamentos.

Os dados foram analisados pelo procedimento GLM do pacote estatístico SAS. Foram verificados se os dados atendiam as pressuposições de normalidade pelo teste de Cramer-von Mises, de homocedasticidade pelo teste de Homocedasticidade: 1 pertence ao  $IC(\lambda)$  e ausência de *outliers*. Para todas as variáveis do primeiro experimento as comparações de médias foram realizadas por meio do teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Para o

segundo experimento a diferença entre as médias dos tratamentos foram determinadas pelo teste “F”.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Co-digestão em biodigestores bateladas

#### 4.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

A Tabela 4 apresenta os valores médios de pH inicial (afluente) e final (efluente) dos substratos de cada tratamento utilizado no abastecimento dos biodigestores.

Tabela 4. Valores médios de pH dos substratos utilizados em biodigestores bateladas.

TRATAMENO	pH Afluente	pH Efluente
0% ARL	6,32	6,28
50% ARL	6,25	6,12
77,5% ARL	6,19	6,09
100% ARL	6,14	5,10
ARL	6,34	3,76

O pH é um dos fatores que influencia a produção de biogás, as bactérias envolvidas no processo de biodigestão anaeróbia dependem de uma faixa considerada ótima para estabilizar o processo.

Os valores de pH encontrados no efluente, quando relacionado com a crescente porcentagem de substituição de água potável por água residuária, sugerem que, o aumento da porcentagem de água residuária proporcionou maior acidificação do meio. Este resultado pode estar relacionado ao fato que a lactose presente na água residuária sofre rápida conversão pelos microrganismos acidogênicos em ácidos orgânicos, que não são convertidos em biogás imediatamente devido às diferenças na taxa de acidogênese e metanogênese (GHALLY, 1996). Assim, o acúmulo desses ácidos orgânicos provocam a descida do pH e inibe a produção de biogás (GLOBOS et al., 2008).

Para a grande maioria das bactérias, o pH ótimo do afluente se localiza entre 6,5 e 7,5 e as variações máximas e mínimas para a maior parte delas estão entre 6 e 8 (Campos et al., 2006). Os substratos com os maiores níveis de água residuária apresentaram pH baixos, inferior a 5,5, valor considerado restritivo para o bom desenvolvimento e desempenho das bactérias envolvidas no processo da biodigestão anaeróbia.

#### **4.1.2 Sólidos totais e voláteis e reduções de sólidos voláteis**

As médias de sólidos totais e voláteis e as reduções de sólidos voláteis da co-digestão anaeróbia de água residuária de laticínio e dejetos bovinos estão apresentados na Tabela 5. Os tratamentos submetidos ao processo de co-digestão anaeróbia apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) quando comparada aos parâmetros analisados.

Tabela 5. Teores médios de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e redução de sólidos voláteis (SV red) para biodigestores bateladas operados com dejetos de bovinos em co-digestão com água residuária de laticínio.

Tratamento	ST				SV				SV red.
	%		kg		%		kg		%
	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	
0% ARL	6,63A	4,44A	0,12A	0,08A	5,89A	3,66A	0,1060A	0,0659A	37,56AB
50% ARL	6,97A	5,04A	0,12A	0,09A	6,21A	4,23A	0,1118A	0,0762A	31,82B
77,5% ARL	6,86A	4,46A	0,12A	0,08A	6,10A	3,70A	0,1099A	0,0666A	39,42AB
100% ARL	6,96A	4,95A	0,12A	0,09A	6,22A	4,13A	0,1120A	0,0744A	33,56B
ARL	1,37B	0,79B	0,02B	0,01B	1,18B	0,61B	0,0212B	0,0109B	48,35A
p-valor	<0001	<0001	0,006	<0001	<0001	<0001	0,006	<0001	0,008
CV%	3,32	7,98	1,94	8,48	3,36	7,98	1,94	8,48	14,95

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

Observa-se que pelos resultados das médias dos tratamentos, com 0, 50, 77,5 e 100% de ARL, não houve grande variação ( $p > 0,05$ ) para os parâmetros analisados de sólidos totais e sólidos voláteis (afluente e efluente), demonstrando que a adição da ARL não interferiu nesses resultados. O tratamento ARL apresentou médias inferiores ( $p < 0,05$ ) aos demais tratamentos que indica, possivelmente, que o teor de ST presente na ARL é mais baixo em relação ao ST encontrado na composição dos dejetos bovinos leiteiros, não sendo suficiente para suprir o ST que o dejetos disponibilizaria ao substrato.

As porcentagens de redução de SV não diferiram ( $p > 0,05$ ) quando se comparam a adição de 0 e 77,5% dos demais. O tratamento ARL, entretanto, apresentou maior porcentagem ( $p < 0,05$ ) de redução de sólidos voláteis, que os substratos com 50 e 100% de ARL, este resultado pode ser em função do substrato possuir a maior quantidade de ARL que é composto de materiais de rápida biodegradação, o que indica a viabilidade desse efluente ser utilizado no processo de co-digestão.

#### 4.1.3 Produção de biogás

A Tabela 6 apresenta as médias do volume total de produção de biogás dos tratamentos em biodigestores bateladas.

Tabela 6. Produção média total, em m<sup>3</sup>, de biogás obtidos de biodigestores bateladas operados com dejetos de bovinos em co-digestão com água residuária de laticínio.

Tratamento	Prod total/ m <sup>3</sup>
0% ARL	0,03225 A
50% ARL	0,26610 B
77,5% ARL	0,03338 A
100% ARL	0,03616 A
ARL	0,00753 C
p-valor	<0001
CV%	8,23

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

Houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) de produção de biogás quando as médias de produção dos tratamentos foram comparadas entre si. Pelos resultados apresentados, na Tabela 6 pode-se observar que o valor médio de produção de biogás (m<sup>3</sup>), para o tratamento com 100% ARL, foi de 0,03616, resultado que demonstra eficiência da co-digestão de água residuária de laticínio com dejetos bovinos, já que esse tratamento comparado ao tratamento controle, ou seja, sem substituição de água potável por água residuária na composição do substrato, não diferiram significativamente ( $p > 0,05$ ).

O tratamento ARL que recebeu quantidade menor de dejetos (0,20 Kg) e maior de água residuária de laticínio (1,6 Kg), em comparação aos demais tratamentos, teve a menor média de produção ( $p < 0,05$ ). Este resultado pode estar associado com as propriedades químicas da água residuária de laticínio quando submetida in natura ou em percentagens superiores ao substrato que está em co-digestão poder causar desequilíbrio às etapas do processo de biodigestão.

Ghaly (1996) explica que a lactose existente no soro, sofre uma rápida conversão pelos micro-organismos acidogênicos em ácidos orgânicos, que não são convertidos em biogás imediatamente, devido às diferenças na taxa de acidogênese e metanogênese.

Os ácidos orgânicos acumulados no processo de biodigestão anaeróbia podem acarretar condições não ideais de desenvolvimento microbiológico o que demonstra que uma das etapas do consórcio anaeróbio está sendo prejudicada (CHERNICHARO, 1997). O acúmulo destes ácidos orgânicos provoca a descida do pH (GOBLOS et al., 2008), propicia a formação de escumas e acarreta menor produção de

biogás (SALMINEN e RINTALA, 2002), o que pode explicar o fato do tratamento ARL, ter apresentado maior oscilação dos demais tratamentos com a menor taxa de produção de biogás no período experimental.

Parzianello (2011) relatou que em experimento de co-digestão anaeróbia de resíduos avícolas com soro de leite (em proporções aleatórias) não houve produção de biogás onde atribui o fato ao baixo valor de pH ideal, que pode ter ocorrido em função da alta capacidade do soro de leite de produzir ácidos orgânicos, dentre eles, o ácido láctico.

#### 4.1.4 Potenciais de produção

A Tabela 7 apresenta as médias da produção diária de biogás em m<sup>3</sup>/kg de dejetos, sólidos totais, voláteis e sólidos voláteis reduzidos nos biodigestores abastecidos com dejetos de bovinos e água residuária de laticínio do primeiro período avaliado.

Para os diferentes níveis de água residuária, os dados de potenciais de produção de biogás apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o tratamento com 50% de água residuária obtendo as menores médias nos parâmetros de potenciais de produção por: estrume, sólidos totais e voláteis adicionados (ST e SV adc.). Não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para produção de biogás por SV reduzidos.

Tabela 7. Médias de potenciais de produção de biogás, por m<sup>3</sup> de biogás por kg: de estrume, sólidos totais e voláteis adicionados (ST e SV adc.), sólidos voláteis reduzidos (SV red.).

Tratamento	Prod./kg estrume	Prod./kg ST adic.	Prod./kg SV adic	Prod./kg SV Red
0% ARL	0,03624 A	0,27037 A	0,30433 A	0,82595 A
50% ARL	0,02932 B	0,20789 B	0,23342 B	0,75776 A
77,5% ARL	0,03800 A	0,27389 A	0,30787 A	0,78128 A
100% ARL	0,40637A	0,28885 A	0,32295 A	0,96558 A
ARL	0,37665 A	0,30557 A	0,35521 A	0,75701 A
p-valor	0.007	0.0001	<0001	0.2655
CV%	7,83	7,82	7,82	17,73

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

O tratamento ARL mesmo apresentando a menor média ( $p < 0,05$ ) de produção de biogás (Tabela 6) demonstra na Tabela 7 médias satisfatórias e não difere ( $p > 0,05$ ) dos demais tratamentos quando se observa o potencial de produção por kg de SV reduzidos. Este resultado pode estar associado ao substrato ter alta concentração de ARL afluyente caracterizado por conter altos teores de materiais orgânicos passíveis de conversões no processo de biodigestão.

As Figuras 4 e 5 apresentam a comparação visual do aspecto físico encontrado, no momento do desabastecimento, dos biodigestores bateladas que receberam o tratamento com 0% de ARL (Figura 4) e o tratamento ARL (Figura 5).

É possível observar que a situação encontrada no biodigestor submetido ao tratamento ARL, induz a possibilidade da formação de espuma, característica às vezes encontrada em processos de tratamento de águas residuais, onde há formação de uma camada superficial dos materiais constituintes de compostos de difícil degradação.

Souza (2006) define espuma como uma camada de materiais flutuantes (gorduras, óleos, ceras e outros materiais) que se desenvolve na superfície de reatores anaeróbios. Segundo Raman et al. (1989) o principal problema da espuma gerada nos digestores anaeróbios é a produção desuniforme de biogás, o que possibilita entupimento de tubulações de saída e conseqüente acúmulo de gás em espaços do reator projetados como volume de digestão.



Figura 4- Efluente - tratamento 0% ARL.



Figura 5- Efluente - tratamento ARL.

### 4.1.5 Nutrientes

Os teores dos minerais (NP) encontrados na matéria seca do efluente dos biodigestores batelada abastecidos com dejetos bovinos sem e com co-digestão com água residuária de laticínio estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Teores de nitrogênio e fósforo nos efluentes dos biodigestores bateladas.

	N	P
Tratamento	Efluente	Efluente
0% ARL	2,39C	0,051 A
50% ARL	2,37 C	0,050 A
77,5% ARL	2,31 C	0,050 A
100% ARL	2,61 B	0,048 A
ARL	2,83 A	0,047 A
p-valor	<0001	0,0379
CV%	2,04	3,44

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

Houve diferença significativa entre os tratamentos para porcentagem de N, o tratamento ARL, diferiu dos demais com a maior média seguida do tratamento com 100 de ARL, possivelmente este resultado pode estar relacionado com a maior porcentagem de sólidos voláteis reduzidos nesses tratamentos o que ocasionou concentração maior de materiais minerais.

## 4.2 Co-digestão em biodigestores contínuos

### 4.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O caráter ácido ou alcalino de uma solução é representado através do potencial hidrogeniônico (pH) que expressa a concentração de íons de hidrogênio (AZZOLINI e FABRO, 2013).

Para que a biodigestão anaeróbia ocorra satisfatoriamente, o pH do sistema deve ser mantido entre 6 e 8, pois as bactérias anaeróbias (metanogênicas) são sensíveis a presença de pH ácido (CORTEZ et al., 2007).

O pH é um parâmetro essencial para equilíbrio das bactérias anaeróbias, substratos em condições de pH ácido desfavorecem a ação das bactérias metanogênicas que são as responsáveis em transformar os ácidos orgânicos em biogás, assim estas podem ser inativas.

Nas Figuras 6 e 7, estão apresentados os valores semanais de pH dos afluentes e efluentes dos dois períodos de avaliação dos biodigestores contínuos.

Nos dois períodos de experimento, os afluentes apresentaram valores de pH dentro da faixa considerada ótima para os micro-organismos desenvolverem.

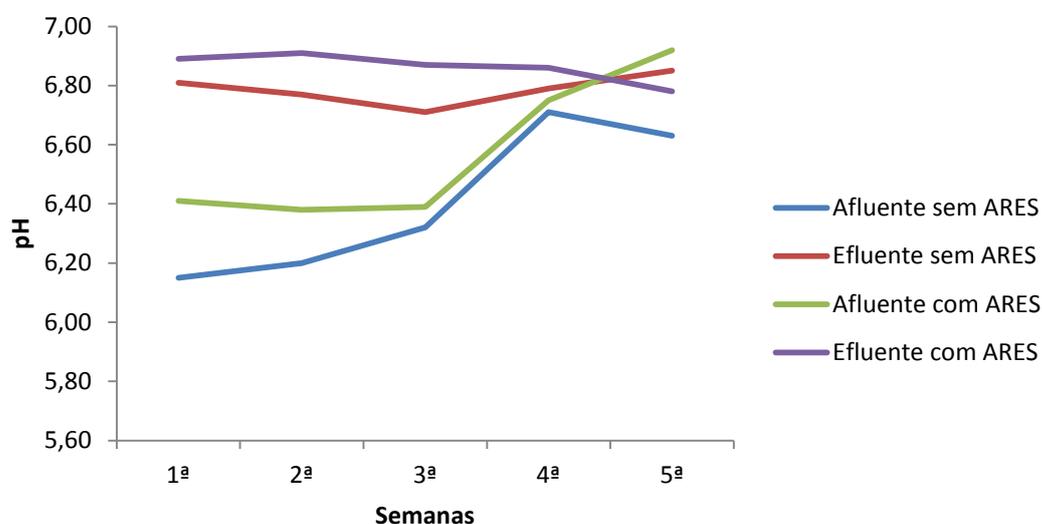


Figura 6. Valores médios do pH dos afluentes e efluentes no decorrer do primeiro período experimental dos biodigestores contínuos.

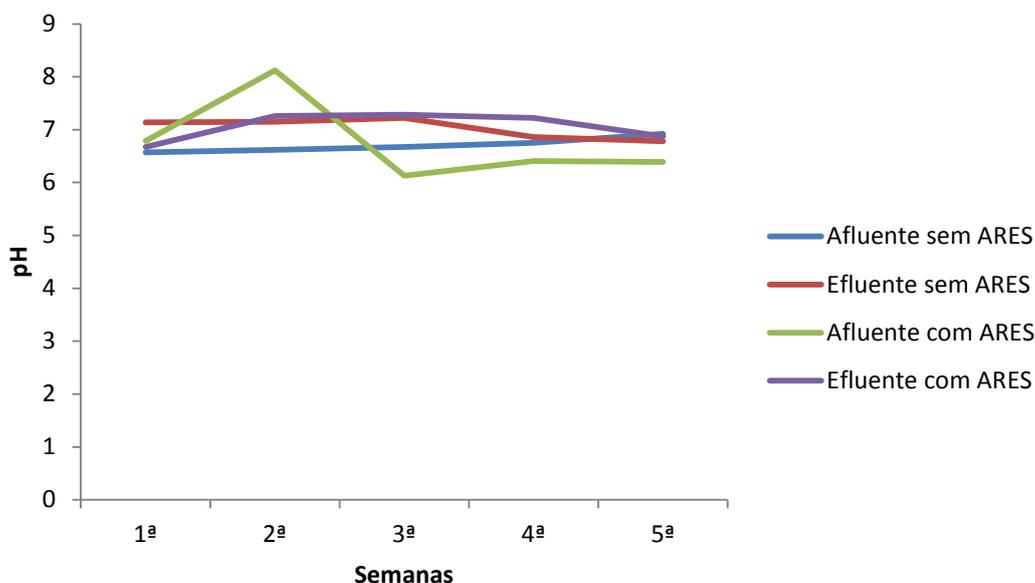


Figura 7. Valores médios do pH dos afluentes e efluentes no decorrer do segundo período experimental dos biodigestores contínuos.

Azzolini e Fabro (2013), avaliando esse parâmetro em pontos de coletas de efluentes de Laticínio após receber tratamento do tipo lodo ativado e lagoas de estabilização encontraram valores de pH próximos a 7, indicando neutralidade e situação aceitável para o desenvolvimento dos micro-organismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica durante a etapa biológica do tratamento.

As variações da temperatura ambiente durante os períodos avaliados estão representadas na Figura 8. A média por período foi de 25,3 °C e 20,8 °C, respectivamente, para período 1 e para o período 2.

Dentre outros, este fator é considerado fator determinante para o melhor desenvolvimento do processo de biodigestão anaeróbia, os micro-organismos envolvidos ao processo são sensíveis às baixas, elevadas temperaturas e também a grandes variações.

A Figura 8 apresenta que não houve grandes variações na temperatura ambiente durante os períodos analisados, assim sendo a temperatura constante não interferiu no processo.

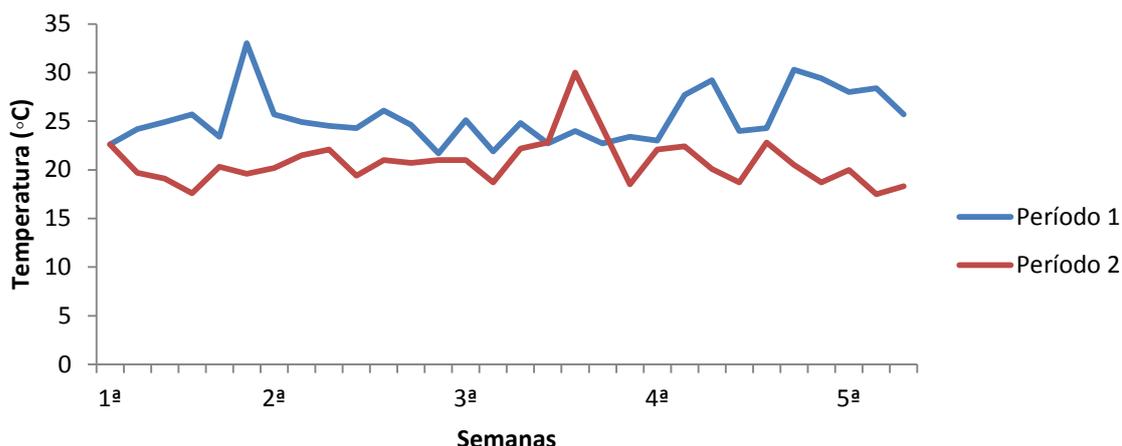


Figura 8. Temperatura ambiente durante o período experimental (°C)

#### 4.2.2 Sólidos totais e voláteis e reduções de sólidos voláteis

Na Tabela 9 e 10, estão apresentados os valores para os teores médios de sólidos totais e voláteis e a porcentagem de sólidos voláteis reduzidos resultantes da biodigestão anaeróbia dos tratamentos para cada período avaliado dos experimentos.

Foi observado efeito significativo ( $p < 0,05$ ), da adição de água residuária de laticínio no processo de biodigestão quando avaliado os parâmetros de teor de sólidos totais, voláteis dos afluentes e efluentes e sólidos voláteis reduzidos entre os tratamentos no primeiro período avaliado. Com maiores médias para o tratamento que recebeu 50% de água residuária, resultado que pode ser explicado pelo fato da água residuária apresentar teor de sólidos totais na sua composição o que pode ter elevado a porcentagem do substrato em co-digestão.

Tabela 9. Teores médios de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em %, e redução de sólidos voláteis (SV) para os biodigestores abastecidos com substratos do primeiro período.

Tratamento	ST				SV				SV red
	%		Kg		%		Kg		%
	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	
SEM ARL	3,08B	2,35B	0,061B	0,047B	2,64B	1,91B	0,0528B	0,038B	27,34B
COM ARL	3,79A	2,74A	0,075A	0,054A	3,24A	2,23A	0,0648A	0,044A	30,94 <sup>a</sup>
p-valor	<0001	<0001	<0001	<0001	<0001	<0001	<0001	<0001	0,0470
CV%	2,63	2,63	3,76	2,63	2,79	3,12	2,79	3,12	7,68

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste F)

No segundo período os parâmetros de sólidos totais, voláteis correspondentes ao afluente e efluente diferiram entre si ( $p < 0,05$ ), com as maiores médias para o tratamento que não recebeu a água residuária de laticínio, resultado este que pode estar conexo ao caso que as amostras dos efluentes brutos do laticínio utilizados nos dois momentos dos experimentos variaram quando ao teor de sólidos, onde o efluente bruto com menor teor de sólidos foi correspondente ao período 2. O parâmetro de sólidos voláteis reduzidos diferiu significativamente ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos, a maior média para o tratamento com a adição da água residuária (Tabela 10).

Weber et al.(2014) avaliaram resíduos gerados por vacas leiteiras e água da atividade de limpeza de um estabulo, com média de ST de 3,98%, em biodigestores de fluxo contínuo com capacidade de 20 m<sup>3</sup>, obtiveram média de redução de SV de 55,10%, valor maior do que o encontrado.

Tabela 10. Teores médios de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em %, e redução de sólidos voláteis (SV) para os biodigestores abastecidos com substratos do 2 experimento.

Tratamento	ST				SV				SV red
	%		Kg		%		Kg		%
	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	
SEM ARL	3,75A	2,37A	0,075A	0,047A	3,45A	1,89A	0,069A	0,047A	40,63B
COM ARL	3,25B	1,87B	0,065B	0,012B	2,83B	1,45B	0,050B	0,037B	48,58 <sup>a</sup>
p-valor	<0001	0,0009	<0001	<0001	<0001	0,0025	<0001	0,0009	0,0118
CV%	3,75	6,30	3,75	7,60	3,26	8,44	3,26	6,30	7,94

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste F)

Fernandez et al (2014) avaliaram resíduos diferentes, lodo de esgoto e soro de queijo, dos utilizados nesse trabalho, porém também estudaram o

comportamento da co-digestão com efluente láctico, em condições mesofílicas (34 °C) e termofílicas (55 °C) e observaram porcentagens de redução de sólidos voláteis obtidas foram de 29% e 6%, respectivamente.

#### 4.2.3 Produção de biogás e mensuração de metano

Os dados de produções diárias de biogás dos tratamentos, em ambos os períodos, estão representados, respectivamente, na Figura 9 e 10. O substrato com 50 e 63,5% de água residuária de laticínio demonstraram ter o mesmo rendimento de produção de biogás do tratamento sem adição de água residuária.

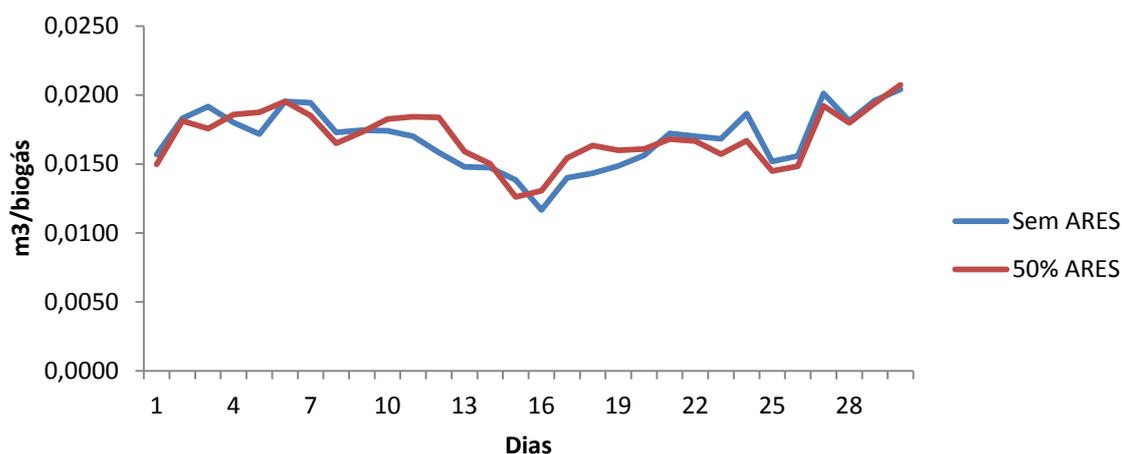


Figura 9. Produções de biogás obtido em biodigestores contínuos operados com dejetos bovinos e dejetos bovinos em co-digestão com 50% de água residuária de laticínio.

Conforme apresentado nas Figuras 9 e 10, observa-se que não houve grandes variações de produção de biogás entre os tratamentos durante o período amostrado para ambos os períodos avaliados.

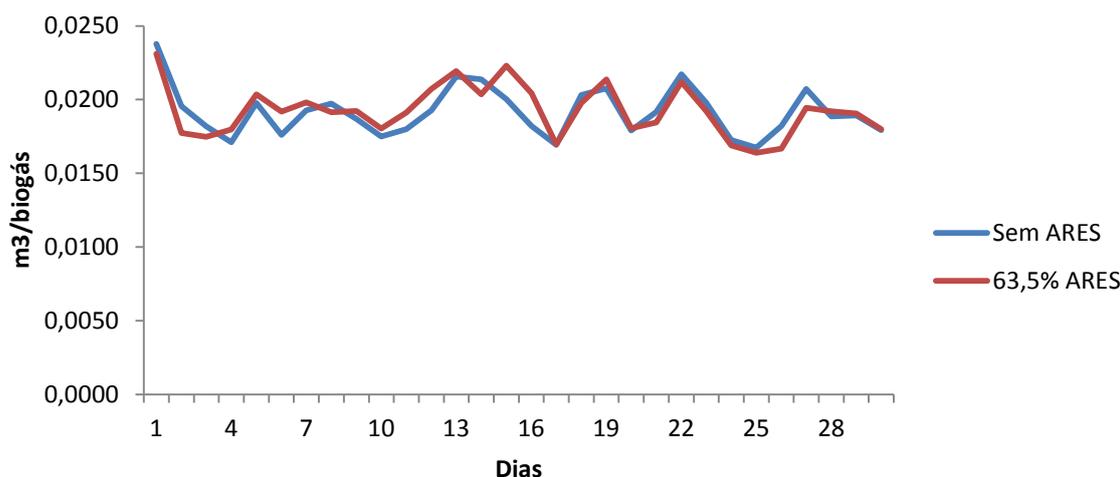


Figura 10. Produções de biogás obtidas em biodigestores contínuos operados com dejetos bovino e dejetos bovinos em co-digestão com 63,5% de água residuária de laticínio.

Os resultados demonstram que a co-digestão de água residuária de laticínio com dejetos bovinos nas condições em que o experimento foi realizado é possível, pois em co-digestão com as percentagens de 50 e 63,5% de água residuária de laticínio as características químicas da água residuária não interferiram de forma negativa na taxa de produção de biogás.

Este resultado pode ser referente à matéria orgânica constituinte da água residuária de laticínio ser passível de degradação quando em teores adequados ao processo de co-digestão com dejetos bovinos, não influenciando de forma contrária aos parâmetros considerados essenciais no processo para eficácia na produção de biogás.

Não houve diferença significativa ( $P > 0,05$ ) para médias obtidas para a produção total de biogás durante os 30 dias sendo 0,5047 e 0,5077  $m^3$ , respectivamente, para os tratamentos com dejetos bovinos (SEM ARL) e dejetos bovinos em co-digestão com 50% de água residuária de laticínio (COM ARL) no primeiro período. No segundo período com médias 0,5447 e 0,5688 para os tratamentos com dejetos bovinos (SEM ARL) e dejetos bovinos em co-digestão com 63,5% de água residuária de laticínio (COM ARL) também não houve diferença significativa ( $p > 0,005$ ) entre os tratamentos.

De acordo com Fernandez (2014) diferentes autores estudaram a utilização da água residuária de laticínios como substratos para o processo de co-digestão e obtiveram resultados bem sucedidos, explicado pelo fato da matéria orgânica encontrada

nesse resíduo ser facilmente degradada e assumir função de equilibrar a relação C/N, assim resultar em aumentos significativos no rendimento de produção de biogás.

As médias de produção de metano ( $\text{CH}_4$ ) em %, contidos no biogás dos biodigestores contínuos nos dois períodos de experimento estão apresentados nas Figuras 11 e 12. A concentração de metano no biogás produzido pelos biodigestores contendo o tratamento sem adição de água residuária de laticínio e os tratamentos com co-digestão de 50% e 63,5% da água residuária de laticínio, em ambos, períodos avaliados obtiveram, teores médios entre 50% e 60%.

Comino et al. (2012) avaliando a co-digestão de dejetos bovinos com proporções de 20%, 30%, 50% e 65% de soro de leite em reatores, obtiveram concentração de metano com cerca de 55%, resultado semelhante ao encontrado nesse trabalho utilizando a água residuária, onde alto volume de resíduo láctico (próximo de 65%) foi adotado.

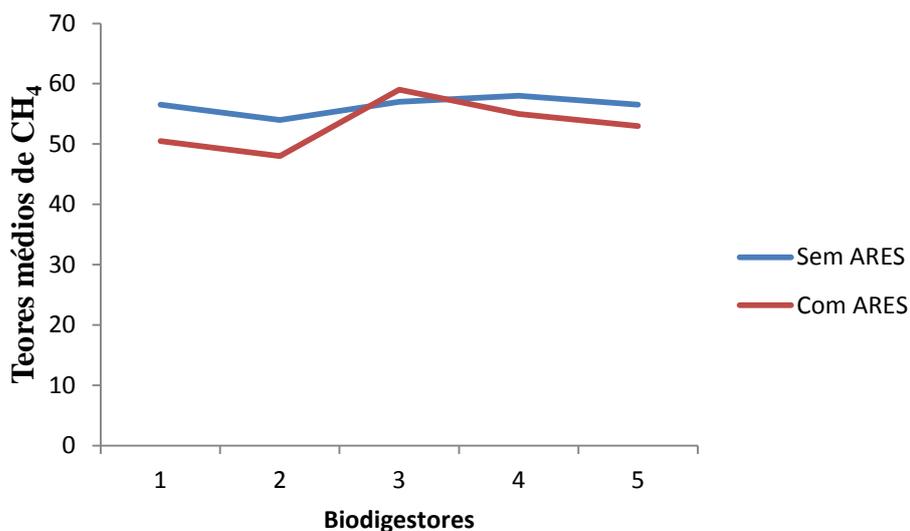


Figura 11. Valores médios de metano ( $\text{CH}_4$ ) em % nos tratamentos sem e com 50% água residuária no primeiro período .

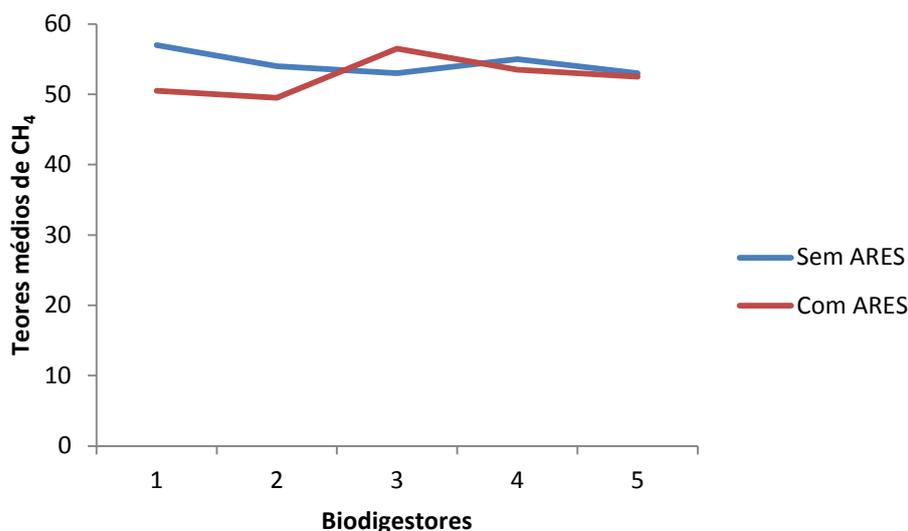


Figura 12. Valores médios de metano ( $\text{CH}_4$ ) em % nos tratamentos sem e com 63,5% água residuária no segundo período.

Rico et al. (2014) em pesquisa com co-digestão anaeróbia de água residual de laticínios e esterco bovino concluiu que constitui bom substrato para o processo onde os resultados obtidos demonstraram que os resíduos líquidos e semi-líquidos da indústria de laticínios teve potenciais de metano no mesmo intervalo como esterco e 35% desse resíduo láctico com base na massa permitiu aumentar 80,5% de rendimento de metano do esterco quando em digestão anaeróbia individual.

#### 4.2.4 Potenciais de produção de biogás

As Tabelas 11 e 12 apresentam as médias da produção diária de biogás em  $\text{m}^3/\text{kg}$  de dejetos,  $\text{m}^3/\text{kg}$  de sólidos totais adicionados (ST ad.),  $\text{m}^3/\text{kg}$  de sólidos totais reduzidos (ST red.),  $\text{m}^3/\text{kg}$  de sólidos voláteis adicionados (SV ad.) e  $\text{m}^3/\text{kg}$  de sólidos voláteis reduzidos (SV red.) nos biodigestores abastecidos com dejetos de bovinos e água residuária de laticínio dos dois períodos avaliados.

Tabela 11. Médias de produção de biogás, por m<sup>3</sup> de biogás por Kg: de dejetos (DEJ), sólidos totais e sólidos voláteis adicionados (ST e SV ad.), sólidos voláteis adicionados reduzidos .

Tratamento	Prod./Kg estrume	Prod./Kg ST adic.	Prod./Kg SV adic	Prod./Kg SV Red
SEM ARL	0,0374 A	0,3456 A	0,4241 A	0,4065 B
COM ARL	0,0376 A	0,3182 B	0,3910 B	0,8680 A
p-valor	0.9064	0,0190	0,0311	<.0001
CV%	7,64	4,07	4,52	7,12

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste F)

Conforme apresentado na Tabela 11, no primeiro período com exceção para o parâmetro de produção por Kg de estrume que não diferiu entre os tratamentos ( $P > 0,05$ ) há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) nos potenciais de produção de biogás de dejetos bovinos sem e com co-digestão de 50% de água residuária de laticínio.

Tabela 12. Médias de produção de biogás, por m<sup>3</sup> de biogás por Kg: de dejetos (DEJ), sólidos totais adicionados (ST ad.), sólidos totais reduzidos (ST red.), sólidos totais voláteis adicionados (SV ad.) e sólidos totais (red.).

Tratamento	Prod./Kg estrume	Prod./Kg ST adic.	Prod./Kg SV adic	Prod./Kg SV Red
SEM ARL	0,0528 A	0,4034 B	0,5055 B	0,6252 A
COM ARL	0,0522 A	0,4857A	0,6635 A	0,6034 A
p-valor	0.8014	0,0282	<0001	0.7559
CV%	6,48	10,05	4,76	17,42

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste F)

É possível observar na Tabela 12 que os tratamentos aplicados no período 2 não diferiram ( $P < 0,05$ ) para as variáveis de produção por m<sup>3</sup>/kg de estrume e por Kg SV reduzidos. As demais variáveis analisadas diferiram entre si, as maiores médias ( $P < 0,05$ ) foram observadas nos biodigestores alimentados com dejetos de bovinos em co-digestão com água residuária (COM ARL).

Esse resultado pode ser devido ao que o tratamento que teve adição da água residuária para o processo de co-digestão com dejetos bovinos ter recebido taxa maior de água residuária constituído de material com maior biodegradabilidade proporcionou melhor condição ao processo.

#### 4.2.5 Determinação de minerais

Os teores dos minerais (NPK) encontrados na matéria seca do efluente dos biodigestores contínuos abastecidos com dejetos bovinos com e sem co-digestão com água residuária de laticínio estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Teores de macro nutrientes nos efluentes dos biodigestores contínuos.

	N		P		K	
	p1	p2	p1	p2	p1	p2
T1	2,39A	2,74A	2,39A	2,42A	2,39 <sup>a</sup>	2,74 <sup>a</sup>
T2	2,37A	2,60A	2,41A	2,82A	3,37 <sup>a</sup>	2,60 <sup>a</sup>
p-valor	0,77	0,29	0,85	0,09	0,77	0,29
CV%	3,68	7,51	5,38	12,37	3,68	7,51

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste F)

Junqueira (2011) avaliou a biodigestão individual de dejetos bovinos em biodigestores contínuos, semelhantes aos utilizados nesse trabalho, obteve resultados diferentes com teores de 2,63% de N, 1,45% de P e 1,69 para K.

## 5 CONCLUSÕES

A co-digestão dos resíduos, dejetos de bovinos leiteiros e água residuária de laticínio, nos níveis testados na composição do substrato destinado aos biodigestores bateladas e contínuos, demonstrou eficácia para a produção de biogás e equivalência nos potenciais de produção de biogás quando comparados ao dejetos de bovino leiteiro submetido ao processo individual de biodigestão. A adoção da água residuária de laticínio, portanto pode ser considerada alternativa de tratamento na co-digestão com dejetos bovinos, solucionando um dos grandes problemas das empresas relacionadas à cadeia leiteira, que é a grande geração de efluente, proporcionando retorno econômico com o biofertilizante e a geração de energia.

Entretanto, a porcentagem da adição de água residuária de laticínio nos substratos requer atenção para que níveis superiores não ocasionem possíveis condições inibidoras ao processo.

## 6 REFERÊNCIAS

ANUALPEC: **Anuário da pecuária brasileira**. São Paulo: Instituto FNP, 380p. 2015.

ANTUNES, A. J. **Funcionalidade de proteínas do soro de leite bovino**. 1 ed. Barueri: Editora Manole, 2003. p. 142

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington, DC, 1995.

APHA. AWWA. WPCF. - American Public Health Association. **Standart methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington, 2000.

ARRUDA, M. H et al. Dimensionamento de biodigestor para geração de energia alternativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**. Garça, v. 1, n. 2, p. 1-8, dez. 2002.

AZZOLINI, J. C.; FABRO, L. F. Monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de um laticínio da região meio-oeste de Santa Catarina. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 4, n. 1, p. 43-60, jan./jun. 2013.

BALBINO, L. C. et al. **Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil**. Pesquisa agropecuária brasileira. v.46, n.10, p.0-0, 2011..

BARBOSA, A.S. et al. Utilização do soro como substrato para produção de aguardente: estudo cinético da produção de etanol. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**. Mossoró, v.5, n.1, p.7-25, jan/mar, 2010.

BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 3ª ed. São Paulo: Ícone, 2011. p. 106.

BARROS, T. D. **Árvore do conhecimento agroenergia: biogás**. Brasília – DF, Embrapa. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe3qf9d0sy.html>>. Acesso em: 23 maio 2015.

BATAGLIA, O. G. et.al. **Métodos de análises químicas de plantas**. Boletim Técnico, Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. p. 48.

Begnini, B. C.e RIBEIRO, H. B. Plano para redução de carga poluidora em indústria de laticínios. *Saúde Meio Ambiente*. v. 3, n. 1, p. 19-30, jan./jun. 2014

BERTIN, L. et al. Innovative two-stage anaerobic process for effective codigestion of cheese whey and cattle manure. **Bioresource Technology** .128, p. 779–783, 2013.

BLANCO, M. F. J. et al. Produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite e cama de aviário. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.3, n.1, p. 14-27, 2014.

BLEY JÚNIOR, C. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2ª ed. Foz do Iguaçu/Brasília: TechnoPolitik Editora, 2009, p.140.

BORDIN, R. A. et al. A produção de dejetos e o impacto ambiental da suinocultura. **Revista de Ciências Veterinárias**. Valinhos, v. 3, n.3, p. 1- 4, 2005.

BRASIL. Política Nacional de Meio Ambiente – Lei 6938/81

BRIÃO, V. B. e TAVARES, C. R. G. Nota Científica: Ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios para recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. **Brazilian Journal of Food Technology** : Campinas, v. 15, n. 4, p. 352-362, out./dez. 2012

BRIÃO, V. B. et al. Ultrafiltração de efluente modelo e efluente industrial de laticínios. **Revista CIATEC** – upf, v.7 (1), p.1-12, 2015.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás.** 1985. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.

CAMPOS, C. M. M.; CARMO, F. R.; BOTELHO, C. G. COSTA, C. C. Development and operation of the upflow anaerobic sludge blanked reactor treating liquid effluent from swine manure in laboratory scale. *Revista Ciências e Agroecologia*, v.30, p. 140-147, 2006.

CARVALHO, E. F. **Perícia agrônômica e ambiental: conduta do perito, laudos e pareceres em face da legislação.** 2ª edição. Goiânia: Kelps, 2011. 852p.

CARVALHO, E. F. **Perícia agrônômica: elementos básicos.** Goiânia: GEV, 2001. p. 433.

CASSINI, S. J. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Rio de Janeiro: ABES, RiMa, Projeto PROSAB, 2003, p. 210.

CERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios – volume 5** . UFMG, 2ª ampl. e atual.2010. p 588.

COMASTRI FILHO, J. A. **BIOGÁS: Independência energética do pantanal mato-grossense.** Corumbá: EMBRAPA. Circular Técnica, 1981. v. 9, p.53.

COMINO, E.; RIGGIO, V. A.; ROSSO, M. Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. **Bioresource Technology** 114, p. 46–53, 2012.

CORTEZ, L. A. B. et al. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). **Biomassa para energia.** Campinas: Editora da UNICAMP, cap. 15, p. 493-529, 2008.

DILALLO, R. ; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direc titration. **Journal Water Pollution Control federation**, Alexandria, v. 33, n. 4, p. 356-365, abril, 1961.

DRAGONE, G.; TEIXEIRA, J. A.; SILVA, J. B. A. Bebidas fermentadas e destiladas a partir do soro de leite. In: VENTURINI FILHO, W. G (Coord.). **Bebidas não alcoólicas: ciências e tecnologia.** SÃO PAULO: BLUCHER, 2011. p. 511 - 536.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Práticas Agroecológicas.** Caldas e biofertilizantes.2006. Disponível em:

<<http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/folder/caldas.pdf>>. Acesso: 12 mar. 2015.

ENSMINGER, M. E.; OLDFIELD, J. E.; HEINEMANN, W. W. **Feeds & nutrition**. 2<sup>a</sup>.ed. Clovis: The Ensminger Publishing Company, p. 1544,1990.

ESPOSSITO, G. et al. Anaerobic co-digestion of organic wastes. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology** .December 2012, v. 11, p. 325-341.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Plano de ação para adequação ambiental das indústrias de recepção e preparação de leite e fabricação de produtos de laticínios no Estado de Minas Gerais: relatório final / Gerência de Produção Sustentável. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, p 129. 2011.

FERNÁNDEZ, C. et al. Anaerobic Co-digestion of Sewage Sludge with Cheese Whey under Thermophilic and Mesophilic Conditions. **International Journal of Energy Engineering** 2014, 4(2): 26-3.

GONÇALVES JUNIOR, A. C.; POZZA, P. C.; NACKE, H.; LAZZERI, D. B.; SELZLEIN, C.; CASTILHA, L. D. Homogeneização e níveis de metais em dejetos provenientes da bovinocultura de leite. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.29, n.2, p.213-217, 2007.

GÓMEZ, X.; CUETOS, M. J.; CARA, J.; MORAN, A.; GARCIA, A. L. 2006. 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**, Schenectady, v. 31, n. 2, p. 2017-2024.

FARIA, C. **Digestão anaerobia**. 2008 Disponível em: <<http://www.infoescola.com/ecologia/digestao-anaerobica/>>. Acesso: 12 mar. 2015.

FERREIRA, A. M. **Manejo reprodutivo de bovinos leiteiros. Práticas corretas e incorretas, casos reais, perguntas e respostas**. Juiz de Fora: Editar Editora Associada, 2012,614 p.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. Plano de ação para adequação ambiental das indústrias de recepção e preparação de leite e fabricação de produtos de laticínios no Estado de Minas Gerais: **relatório final** / Gerência de Produção Sustentável . Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2011. 129p.

GALVÃO, J. A. et al. Minimização de resíduos agroindustriais de origem animal e obtenção de co-produtos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 3, 2013 – São Pedro. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa. 2013. p. 1-3.

GHALY, A. A comparative study of anaerobic digestion of acid cheese whey and dairy manure in a two-stage reactor. **Bioresource Technology**, v. 58, n. 1, p. 61-72, 1996.

GOBLOS, S. et al. Comparison of the effectivities of two-pHase and single-pHase anaerobic sequencing batch reactors during wastewater treatment. **Renewable Energy**, v. 33, p. 960-965. 2008

HANAKI, K.; MATSUO, T.; NAGASE, M. Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 23, p. 1591-1610, 1981.

JENKINS, S. R.; MORGAN, J. M.; ZHANG, X. Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. **Journal WPCF**, Alexandria, v. 63, n. 1, p. 28-34, 1991.

JERÔNIMO, C. E. M. et al. Qualidade ambiental e sanitária das indústrias de laticínios do município de Mossoró-RN. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v.7, n. 7, p. 1349-1356, mar-ago, 2012.

JUNQUEIRA, J. B. **Biodigestão anaeróbia e compostagem com dejetos de bovinos confinados e aplicação de biofertilizante e do composto em área cultivada com *Panicum maximum* JACQ., CV TANZÂNIA** . 2011.103f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP, Campus de Jaboticabal, 2011.

KHATOUNIAN, C. A. **Reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica, 2001. 348 p.

KUMMER, A. C. B. et al . Tratamento de efluente de abatedouro de tilápia com adição de manipueira na fase anóxica. **Engenharia Agrícola.**, Jaboticabal , v. 31, n. 1, p. 150-157, fev. 2011 .

KUNZ, A. et al. Comparativos de custo de implantação de diferentes tecnologias de armazenagem/ tratamento e distribuição de dejetos de suínos. **Circular técnica 42**. Concórdia: Embrapa, 2005, p 1-16.

LUCAS JUNIOR, J. Biodigestores para o meio rural. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 24, 1995, Viçosa. **Palestra...** UFV: SBEA,1995.

MAGANHA, M. F. B. **Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos**. São Paulo: CETESB, 2008. 95p.

MALAVOLTA, E. et al. Micronutrientes, uma visão geral. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. **Micronutrientes na Agricultura**. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1991. p. 1-33.

MANIGLIA, E. A agroindústria na região sudeste. In: ZIBETTI, DARCY WALMOR e BARROSO, LUCAS ABREU. **Agroindústria: uma análise no contexto socioeconômico e jurídico brasileiro**. São Paulo: editora e livraria Universitária de Direito, 2009. 327 p.

MATOS, A. T. **Poluição ambiental. Impactos no meio físico**. 1ª edição. Viçosa, MG: ed. UFV, 2010, 260 p.

MENDES et al. Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 296-305, 2005.

MENDES, et al. Biodegradação de águas residuárias de laticínios previamente tratadas por lipases. **Brazilian Journal of food Technology**, v.9, n.2, p. 143-149, abr/jun, 2006.

MIRANDA, A. P. **Suínos em diferentes fases de crescimento alimentados com milho ou sorgo: desempenho, digestibilidade e efeitos na biodigestão anaeróbia**. 2009.123f. Tese (Doutorado em Zootecnia) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP, Campus de Jaboticabal, 2009.

MORGAN, A. **Biodigestor produz biogás, uma fonte de energia alternativa**. 2010. Disponível em: < <http://www.cpt.com.br/noticias/biodigestor-produz-biogas-uma-fonte-de-energia-alternativa>>. Acesso: 29 de jun. de 2015.

NETTO, C. G. Subproduto lácteo vira na FEA ingrediente rico em nutrientes. Campinas: **Jornal da Unicamp**, 2009.

NIRENBERG, L. P.; FERREIRA, O. M.; Tratamento de águas residuárias de indústria de laticínios: eficiência e análise de modelos matemáticos do projeto da Nestlé Goiânia- GO. 2005. Disponível em: <<http://www.ucg.br/ucg/prope/cpgss/ArquivosUpload/36/file/TRATAMENTO%20DE%200%C3%81GUAS%20RESIDU%C3%81RIAS%20DE%20IND%C3%9ASTRIA%20DE%20LATIC%C3%8DNIOS%E2%80%A6.pdf>> Acesso em: 03 AGO 2016.

NOGUEIRA, L. A. HORTA. **Biodigestão a alternativa energética**. São Paulo: NOBEL, 1986. 93p.

NOGUEIRA, R. G. S. **Inclusão de cana de açúcar triturada em biodigestores abastecidos com dejetos de bovinos de corte confinado**. 2013. 74f. Tese (Mestrado em Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP, Botucatu, 2013.

Oliveira, A. B. M. et al. Biodigestão anaeróbia de efluente de abatedouro avícola. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n.6, p. 690-700, nov/dez, 2011.

ORRICO JUNIOR, M. A. P. **Aproveitamento dos dejetos gerados na suinocultura e bovinocultura de corte: efeitos das dietas no processo de biodigestão anaeróbia e uso do biofertilizante na produção de forragem**. 2011. 83 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, 2011.

OSAKI, F. **Calagem e Adubação**. 1ªed.Campinas: Curitiba, 1990. p. 526.

PARZIANELLO, J. E. **Avaliação de biodigestão anaeróbia da mistura de resíduos avícolas e lácteos**. 36f. Dissertação (Bacharelado e Licenciatura em Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

PAULA, J. E. **As atividades rurais e urbanas no contexto do aumento da temperatura da Terra**. Brasília, DF: Cinco Continentes, 2010. 304 p.

PENNA, A. L. B. Bebidas lácteas. In: VENTURINI FILHO, W. G. **Bebidas não alcoólicas: ciências e tecnologia**. 1º ed. São Paulo: BLUCHER, 2010. p. 89 - 115.

PECORA, V. et al. **Biogás: estudo de caso em São Paulo**. Encontro brasileiro-britânico: energias renováveis para uma vida sustentável. São Paulo: IEE USP. 2008

PEREIRA, M. F. **Construções Rurais/Milton Fischer Pereira**. 1ªed. São Paulo:Nobel, 1986. p. 336.

PERISSINOTTO, M. et al. Conforto térmico de bovinos leiteiros confinados em clima subtropical e mediterrâneo pela análise de parâmetros fisiológicos utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Ciências Rural**, Santa Maria, v.39, n. 5, p. 1492-1498, ago, 2009.

QUADROS, D. G. **Biodigestor na agricultura familiar do semiárido**. 1ªed. Salvador: EDUNEB, 2009. p. 96.

RAMAN, P. et al.. **A static scum-breaking net for fixed-dome biogás plants**. *Biological Wastes* 30: 12 (1989).

RAMOS, T. M. et al. Análise colorimétrica de soro proveniente da fabricação de ricota e xarope de lactulose. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 19, 2010, Lavras. **Anais...** Lavras, 2010.

RICO, C. et al. Biogás production from various typical organic wastes generated in the region of Cantabria (Spain): Methane Yields and Co-Digestion Tests. **Smart Grid and Renewable Energy**, **5**, 128-136, 2014.

RODGERS, M.; ZHAN, X.; DOLAN, B. Mixing characteristics and whey wastewater treatment of a novel moving anaerobic biofilm reactor. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A – Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, v. A39, n. 8, p.2183-2193, 2004.

ROYA, B. et al. Biogás: uma energia limpa; Rio de Janeiro. **Revista Eletrônica Novo Enfoque**, 2011.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste - a review. **Bioresource Technology** v. 83, p. 13-26, 2002.

SANTOS, E.L. B.E NARDI JUNIOR, G. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DE ORIGEM ANIMAL. **Tekhne e Logos**, Botucatu, SP, v.4, n.2, Ago., 2013.

SARAIVA, C. B. et al.. CONSUMO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE EFLUENTES EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS. **Rev. Inst. Latic. “Cândido Tostes”**, Mar/Jun, nº 367/368, 64: 10-18, 2009

SEGANFREDO, M. A et al.. **Gestão Ambiental na Suinocultura**. 1ªed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2007. 302 p

SILVA, D. J. **Resíduos na indústria de laticínios**. Série sistema de gestão ambiental. Viçosa, MG, 2011.

SILVA et al. Adição de água residuária de laticínio em substrato para produção de mudas de maracujazeiro ‘amarelo’. **Revista Agrarian**, Dourados, v.7, n.23, p.49-59, 2013.

SILVA, F. K., EYNG, J. O tratamento de águas residuais de indústria de laticínios: um estudo comparativo entre os métodos de tratamento com biofiltro e com o sistema convencional de lagoas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 4 – 22, out/mar.2013.

SOUZA, L. A. **Poder calorífico dos combustíveis**. 2012 . Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com/quimica/poder-calorifico-combustiveis.htm>> . Acesso: 03 de jun. de 2015.

SOUZA, L. C. **Águas e sua proteção**. 1ª ed. Curitiba: Juruá, 2009. 146 p.

TRINDADE, M. C. **Estudo da recuperação de ácido láctico proveniente do soro de queijo pela técnica das membranas líquidas surfatantes**. Tese (Mestrado em Química). Escola de Engenharia Química da UFMG, Belo Horizonte, 2002.

VALENTE JUNIOR, A. S.; SANTOS, J. A. N.; SOUZA, G. S. A agroindústria na região nordeste. In: ZIBETTI, D. W. e BARROSO, L. A. **Agroindústria: uma análise no contexto socioeconômico e jurídico brasileiro**. 1 ed. São Paulo: Universitária de Direito, 2009. 327 p.

VERNEQUE, R. S. et al. **Seleção para objetivos econômicos em gado de leite**. 1ª edição. Juiz de Fora: Embrapa gado de leite, 2006. 152 p.

VIDAL, G. **Anaerobic digestion of livestock: perspectives from latinoamerica**. São Pedro: SIGERA, 2013. Disponível em: <[http://www.sbera.org.br/3sigera/obras/Palestra\\_01\\_Gladys\\_Vidal.pdf](http://www.sbera.org.br/3sigera/obras/Palestra_01_Gladys_Vidal.pdf)>. Acesso em 14 jun 2015.

VILLELA, I. A. C.; Silveira, J. L. **Aspectos técnicos da produção de biogás em um laticínio Janus**, Lorena, ano 2, nº 2, 1º semestre de 2005.

WEYERMÜLLER, A. R. **Direito ambiental e aquecimento global**. São Paulo: Atlas, 2010. 182 p.

Wu, W. Anaerobic Co-digestion of Biomass for Methane Production: Recent Research Achievements. 2000.

ZEN, S. et al. **Pecuária de corte brasileira: impactos ambientais e emissões de gases efeito estufa (GEE)**. Piracicaba: ESALQ/CEPEA, 2008.