

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS MEDIANEIRA**

LEONARDO PEREIRA LINS

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE
BOVINOCULTURA LEITEIRA POR MEIO DA CODIGESTÃO COM
MACRÓFITAS DA ESPÉCIE *Salvinia*.**

DISSERTAÇÃO

MEDIANEIRA

2017

LEONARDO PEREIRA LINS

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE
BOVINOCULTURA LEITEIRA POR MEIO DA CODIGESTÃO COM
MACRÓFITAS DA ESPÉCIE *Salvinia***

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais - PPGTAMB - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Campus Medianeira. Área de Concentração: Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt

Coorientador: Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare

MEDIANEIRA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

L759p

Lins, Leonardo Pereira

Produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie *Salvinia* / Leonardo Pereira Lins – 2017.

80 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Paulo Rodrigo Stival Bittencourt

Coorientador: Laercio Mantovani Frare

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2017.

Inclui bibliografias.

1. Bovinos de leite. 2. Impacto ambiental. 3. Tecnologias Ambientais - Dissertações. I. Bittencourt, Paulo Rodrigo Stival, orient. II. Frare, Laercio Mantovani, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. IV. Título.

CDD: 600

Biblioteca Câmpus Medianeira
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219

TERMO DE APROVAÇÃO

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE BOVINOCULTURA LEITEIRA POR MEIO DA CODIGESTÃO COM MACRÓFITAS DA ESPÉCIE *Salvinia*

Por

LEONARDO PEREIRA LINS

Essa dissertação foi apresentada às 08h30, do dia 28 de abril de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologias de Tratamento e Valorização de Resíduos, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt (Orientador - PPGTAMB)

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare (Coorientador - PPGTAMB)

Profa. Dra. Janine Padilha Botton (Membro Externo - UNILA)

Profa. Dra. Dangela Maria Fernandes (Membro Interno - UTFPR)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa

À minha esposa, Graciela pelo incentivo,
companheirismo e amor, e por ter dado meu maior
presente, meu filho Arthur.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sempre estar ao meu lado.

À minha esposa Graciela e ao meu filho Arthur, por sempre estarem ao meu lado, pelo incentivo em todas as horas e por sempre acreditarem e mim.

Aos meu pais, Aparecido e Maria, por nunca medirem esforços para dar aos filhos, sabedoria, incentivo e amor.

Ao meus orientadores, Prof. Dr. Paulo, por ter me dado a oportunidade de trabalhar com um novo tema para ele, e ao Prof. Dr. Laércio, por ter acreditado e me apoiado, tirando dúvidas importantes e norteando minhas pesquisa.

As amigas de turma, Alessandra, Ionara, Nathieli e Nyara, pelo apoio e amizade.

À equipe do Laboratório de Biogás do Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (CIBiogás-ER), Juliana e Yolanda que tiveram participação importante nesta pesquisa.

À doutoranda Eliana De Bona (UNIOESTE) e ao Prof. Thiago Edwiges (UNIOESTE-UTFPR), pelas trocas de informação.

Ao CIBiogás-ER pelo apoio dado à esta pesquisa e também pelo seu papel na história do biogás.

Ao produtor rural Sr. Sírio Sérgio Nath e sua família, pela disponibilização da área para estudo.

Aos colegas e professores da 3ª Turma do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus de Medianeira-PR.

À toda minha família...

Obrigado!

RESUMO

LINS, Leonardo Pereira. **Produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie *Salvinia***. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2017.

A produção de leite, em pequenas propriedades, é uma atividade importante na produção de alimentos, mas, que pode causar impactos ambientais devido a geração de dejetos que precisam ser tratados antes de serem dispostos no ambiente, para evitar a contaminação de rios, córregos e riachos. A contaminação de corpos hídricos por esses resíduos, ou por outros, pode provocar o aumento de nutrientes e favorecer a proliferação das algas e macrófitas. O tratamento destes resíduos, da atividade agropecuária, pode ser realizado por meio da digestão anaeróbia, que tem como produtos, o biogás e o biofertilizante, de modo a reduzir os impactos ambientais. Neste trabalho, o objetivo foi avaliar o potencial de produção de biogás a partir da biodigestão dos resíduos da atividade de produção de leite, de uma pequena propriedade na Região Oeste do Paraná, com a inclusão da macrófita *Salvinia*, que é comum na região de estudo. Para avaliar o potencial de produção de biogás, tanto o efluente bovino quanto a macrófita *Salvinia* foram caracterizados mediante a realização de ensaios de Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV). Os ensaios de avaliação do Potencial Metanogênico Bioquímico (PMB) foram conduzidos em reatores, em batelada em escala de bancada, considerando o efluente bovino e misturas com as macrófitas, na forma *in natura* e desidratada, nas concentrações de 6, 7, 8 e 9%. Os resultados da produção volumétrica de biogás e metano em função da massa de sólidos voláteis, a partir das misturas realizadas de 6, 7, 8 e 9%, foram de 286 e 197, 250 e 178, 234 e 162 e, 203 e 143 $L_N.kgSV^{-1}$, respectivamente. Quando se relacionam os resultados do poder calorífico obtido para cada amostra, a mistura com 8% de macrófitas foi a que apresentou melhor resultado com $5.237 kcal.m^{-3}$. Avaliou-se também o resultado final pela produção de biogás e metano em volume produzido por quilograma de massa fresca. Novamente a mistura com 8% foi a que apresentou melhor resultado, com 12,8 L_N de biogás por quilograma de biomassa. Portanto, considerando uma produção diária de 600 L de dejetos, a estimativa de produção de biogás da mistura com 8% foi de 7,7 Nm^3 e a do efluente bovino é de 6,8 Nm^3 . Embora que, com esta mistura de substrato tenha o aumento de biogás, quando quando se avalia os custos de implantação de projeto (como coleta, secagem, trituração e armazenagem), bem como uso do sistema já existente, conclui-se que a implantação deste projeto em escala real não é viável, mas pode ser um índice para outra forma de manejo.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia. Aproveitamento. Resíduos. Bovinocultura de leite.

ABSTRACT

LINS, Leonardo Pereira. **Production of biogas from dairy cattle residues by means of codigestion with macrophytes of *Salvinia* species**. 2017. 81 f. Dissertation (Masters in Environmental Technologies) - Graduate Program in Environmental Technologies, Federal Technological University of Paraná. Medianeira, 2017.

Milk production in small farms is an important activity in food production but can cause environmental impacts due to the generation of waste that needs to be treated before being disposed of in the environment to avoid contamination of rivers, streams and Streams Contamination of water bodies by these or other residues may lead to increased nutrients and favor the proliferation of algae and macrophytes. The treatment of these residues, from agricultural and livestock activities, can be carried out through anaerobic digestion, which has biogas and biofertilizer as products, in order to reduce environmental impacts. In this work, the objective was to evaluate the potential of biogas production from the biodigestion of residues from the milk production activity, from a small property in the Western Region of Paraná, with the inclusion of *Salvinia* macrophyte, which is common in the study region. In order to evaluate the biogas production potential, both the bovine effluent and the *Salvinia* macrophyte were characterized by tests of Total Solids (TS), Fixed Solids (FS) and Volatile Solids (VS). The assays for the evaluation of the Biochemical Methanogenic Potential (BMP) were conducted in batch reactors in the bench scale, considering the bovine effluent and mixtures with the macrophytes, in natura and dehydrated form, at concentrations of 6, 7, 8 and 9 %. The results of the volumetric production of biogas and methane as a function of the mass of volatile solids from the mixtures of 6, 7, 8 and 9% were 286 and 197, 250 and 178, 234 and 162 and 203 and 143 L_N.kgSV⁻¹, respectively. When the results of the calorific value obtained for each sample were related, the mixture with 8% of macrophytes was the one with the best result with 5,237 kcal.m⁻³. The final result was also evaluated by the production of biogas and methane in volume produced per kilogram of fresh mass. Again the mixture with 8% showed the best result, with 12.8 L_N of biogas per kilogram of biomass. Therefore, considering a daily production of 600 L of waste, the biogas production estimate of the mixture with 8% was 7.7 Nm³ and that of the bovine effluent is 6.8 Nm³. Although, when this substrate mix has an increase in biogas, when evaluating project implementation costs (such as collection, drying, grinding and storage), as well as the use of the existing system, it is concluded that the implementation of this Scale project is not feasible but may be an index to another form of management.

Keywords: Anaerobic Digestion. Exploitation. Waste. Dairy cattle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do efetivo bovino (em milhões de cabeças), segundo as grandes regiões no período de 1985-2015.	17
Figura 2 – Rebanho bovino por regiões do Estado do Paraná.	18
Figura 3 – Classificação dos grupos de macrófitas no ambiente aquático.	20
Figura 4 – Ilustração dos cinco grupos de macrófitas aquáticas.	21
Figura 5 – Exemplo de lagoa com elevada quantidade de macrófitas em sua superfície.	22
Figura 6 – Mapa da BP3 – Lago de Itaipu.	24
Figura 7 – Lagoas contendo elevadas quantidades de macrófitas. Imagem de uma espécie de macrófita (A). Imagem de uma lagoa localizada no município de Pato Bragado-PR (B). Imagem de lagoas localizadas no município de Marechal Cândido Rondon-PR (C e D).	25
Figura 8 – Ilustração de biodigestores: (A) Ilustração de um biodigestor canadense; (B) Ilustração de um biodigestor de fluxo ascendente.	26
Figura 9 – Sequências metabólicas do processo de digestão anaeróbia.	27
Figura 10 – Comparação do biogás da bovinocultura leiteira com o biogás proveniente do tratamento de outros substratos.	28
Figura 11 – Taxas relativas de crescimento das arqueias metanogênicas, de acordo com as faixas ótimas de temperatura.	31
Figura 12 – Curvas típicas de frequência acumulada da produção de biogás.	32
Figura 13 – Localização da propriedade em Marechal Cândido Rondon-PR.	35
Figura 14 – Ilustração do fluxo de atividades da bovinocultura leiteira.	36
Figura 15 – Casa de máquinas (A), tanque de homogeneização (B) e gasômetro (C).	37
Figura 16 – Biodigestor vertical de fluxo ascendente. Modelo Biokohler®.	37
Figura 17 – Trajeto do gasoduto entre a propriedade rural até a MCT.	38
Figura 18 – Macrófitas <i>Salvinia</i>	40
Figura 19 – Material já triturado que foi seco à temperatura ambiente.	41
Figura 20 – Material já triturado que não foi seco.	41
Figura 21 – Ilustração do sistema contendo reator, eudiômetro e frasco de nível.	42
Figura 22 – Macrófita parcialmente seca (A). Material seco e triturado, pronto para a realização dos ensaios laboratoriais (B).	44

Figura 23 – Curva de produção de biogás da amostra de celulose cristalina.	50
Figura 24 – Produção de biogás ao longo dos dias.....	52
Figura 25 – Resultados dos ensaios de PMB da primeira fase – primeira etapa.	53
Figura 26 – Resultados da composição de celulose, hemicelulose lignina para a macrófita.....	55
Figura 27 – Mistura da macrófita com dejetos bovinos dentro do digestor.	56
Figura 28 – Digestores prontos para incubação.....	57
Figura 29 – Digestores já acoplados aos eudiômetros.....	57
Figura 30 – Curva de produção de biogás das amostras analisadas.....	59
Figura 31 – Valores do PCI do biogás obtidos nas diferentes amostras analisadas.	64
Figura 32 – Produção de biogás (L) por Kg de massa fresca.	65
Figura 33 – Estimativa da produção diária de biogás (m ³) na propriedade rural.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Geração de resíduos na bovinocultura leiteira.....	18
Tabela 2. Concentração de ST e SV de diversas biomassas.	30
Tabela 3. Amostras que foram incubadas para o ensaio de PMB.	42
Tabela 4. Amostras que foram incubadas no laboratório para o ensaio de PMB de codigestão.....	45
Tabela 5. Poder calorífico inferior de cada componente do biogás.	47
Tabela 6. Teor de umidade das amostras analisadas.	48
Tabela 7. Resultados de ST, SF e SV das amostras de efluente bovino e macrófitas.	48
Tabela 8. Composição das amostras utilizadas nos ensaios de PMB.....	51
Tabela 9. Resultados de ST, SF, SV e relação de ST/SV do efluente bovino e da macrófita desidratada.....	56
Tabela 10. Composição das amostras utilizadas nos ensaios de PMB.....	57
Tabela 11. Composição das amostras utilizadas nos ensaios de PMB.....	57
Tabela 12. Resultados médio da geração de biogás e metano das amostras analisadas.....	60
Tabela 13. Comparativo entre autores dos resultados de PMB das amostras puras.	61
Tabela 14. Comparação dos resultados entre autores, com as amostras que sofreram codigestão.....	61
Tabela 15. Composição média do biogás durante o experimento.....	63
Tabela 16. Valores da composição do biogás utilizados para cálculo do PCI e o PCI calculado.....	63
Tabela 17. Equivalência do PCI do biogás do efluente bovino e da mistura 3 em relação à outros combustíveis.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%m _i	Fração mássica
\overline{MM}	Massa molecular média
BPIII	Bacia do Paraná III
cal	Caloria
CIBIOGÁS-ER	Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
g	Grama
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Kg	Quilograma
km	Quilometro
km ²	Quilometro ao quadrado
L	Litro
L _N	Litros normalizados
m	Metro
m ³	Metro cubico
MM _i	Massa molar do gás
MW	Megawatt
P	Pressão
PCI	Poder calorífico inferior
pH	Potencial hidrogeniônico
PMB	Potencial Metanogênico Bioquímico
ppm	Parte por milhão
R	Constante de gases ideais
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
T	Temperatura
ton	Tonelada
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>

y_i

Concentração do gás

ρ

Densidade do gás

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	BIOMASSA ANIMAL.....	16
2.2	BIOMASSA VEGETAL.....	19
2.2.1	Macrófitas na Região Oeste do Paraná	23
2.3	PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA E CODIGESTÃO	25
2.4	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	29
2.4.1	Parâmetros de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis.....	29
2.4.2	Produção de biogás e metano por meio de biomassa	30
3	OBJETIVO	34
3.1	OBJETIVO GERAL	34
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.2	LABORATÓRIO PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES	38
4.3	CARACTERIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS BIOMASSAS.....	39
4.3.1	Coleta da Biomassa Animal.....	39
4.3.2	Coleta da Biomassa Vegetal.....	39
4.3.3	Ensaio Físico-Químicos e PMB.....	41
4.3.4	Ensaio de Celulose, Hemicelulose e Lignina para Macrófita	43
4.4	ENSAIOS PARA CODIGESTÃO DO EFLUENTE BOVINO COM MACRÓFITAS	43
4.4.1	Coleta da Biomassa Animal.....	44
4.4.2	Coleta da Biomassa de Origem Vegetal	44
4.4.2.1	Determinação do poder calorífico inferior do biogás gerado durante o ensaio de PMB	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS BIOMASSAS ...	48
5.1.1	Ensaio de PMB com Celulose Microcristalina	49
5.1.2	Ensaio de PMB com Inóculo, Efluente Bovino e Macrófitas.....	50
5.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA ..	54
5.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA CODIGESTÃO	55
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICE.....	75

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimentos está cada vez maior e, a demanda por energia, também está inserida na mesma situação. Os avanços técnicos na produção de alimentos podem trazer novas possibilidades para suprir este aumento do consumo, mas, como consequência do incremento da produção de alimentos, há o acréscimo na geração de resíduos que, em muitos casos, não recebem o tratamento adequado. Uma das atividades que se pode destacar é a bovinocultura leiteira, que precisou intensificar a sua produção.

Desta forma, para evitar a ocorrência de impactos ambientais na água, no solo e no ar, devido ao descarte inadequado destes resíduos, os mesmos podem ser aproveitados para a geração de energia. Para a extração do potencial energético desses resíduos pode ser utilizado o tratamento por biodigestão anaeróbia. O objetivo de utilizar-se a biodigestão anaeróbia é reduzir a carga orgânica dos resíduos e obter como subprodutos um gás, denominado de biogás, e um efluente tratado.

O biogás possui um elevado poder calorífico, devido a presença de metano, e pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou veicular. Mesmo após o tratamento anaeróbico, o efluente possui um elevado teor de nutrientes, tais como, nitrogênio e fósforo. Estes nutrientes ao serem dispostos corpos hídricos, por erosão do solo ou por lançamentos inadequados, promovem o crescimento de plantas aquáticas, como as macrófitas.

A multiplicação das macrófitas nos corpos hídricos pode trazer prejuízos tanto ambientais como comerciais, pois, podem dificultar na navegação de barcos e na geração de energia em hidrelétricas. Estas plantas aquáticas são consideradas um tipo de biomassa, que dependendo da sua disponibilidade, existe a possibilidade da sua utilização para a produção de biogás, ou como um substrato de complemento para outras biomassas. Com isso é possível agregar valor a resíduos, que antes não tinham finalidade em uma propriedade rural para a produção de energia, levando assim, a ganhos na qualidade de vida, no meio ambiente e retorno econômico para os produtores. A biodigestão anaeróbia de um efluente de bovinocultura de leite com o incremento das macrófitas, (codigestão), resolve três problemas: o correto tratamento de efluentes da bovinocultura de leite, a redução das plantas aquáticas,

denominadas de macrófitas e a geração de energia para suprir a demanda da propriedade.

Apesar das pesquisas que, relacionam o uso de macrófitas em processo de codigestão com outros substratos, não se identificou a espécie *Salvinia* na produção de biogás. Triscare et al. (2009) e Buss (2015), mostraram o aumento da produção de biogás na codigestão, mas com outros tipos de plantas. Por este motivo, a busca de outras espécies na produção de biogás é importante para estabelecer uma relação de plantas que podem ser utilizadas na biodigestão. Desta forma, dependendo da quantidade em que é produzida e dos tipos de biomassas disponíveis para o processo de codigestão, pode ser um complemento na produção de biogás.

Neste sentido, a elevada quantidade e disponibilidade de macrófitas existentes em rios, lagoas e tanques de tratamentos de resíduos na Região Oeste do Paraná, principalmente em propriedades de bovinocultura, foi proposta a codigestão destas plantas com o efluente bovino de produção de leite em biodigestores, para avaliar a produção de biogás. A análise da viabilidade técnica da melhor configuração para produção de biogás foi obtida ao testar diferentes arranjos de misturas de efluentes da produção leiteira com as macrófitas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

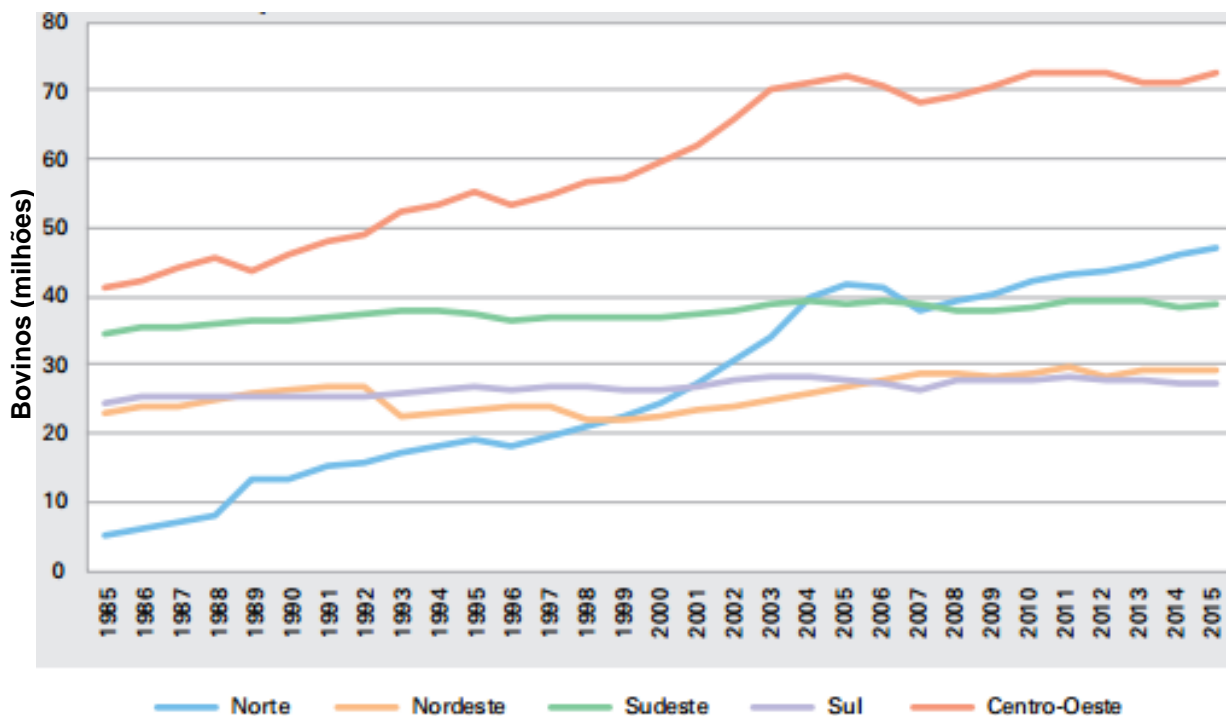
2.1 BIOMASSA ANIMAL

Em função da necessidade global de alimentos, as cadeias alimentícias podem sofrer modernizações. A fim de atender a este crescimento, destacam-se as atividades agrícolas e, principalmente, agropecuárias. De acordo com Fernandes et al. (2015), a atividade agropecuária mostra um intenso dinamismo na economia brasileira, tornando-se à base de sustentação da economia do país. Contudo, proporcionalmente a este crescimento, há a geração de resíduos advindos dessas atividades e, conseqüentemente, os impactos ambientais são significativos quando não ocorre o tratamento adequado.

Entre os principais ramos das atividades agropecuárias, destaca-se a produção de leite que, conforme a Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2015), a produção ultrapassou a marca de 35 bilhões de litros. Em 2015, o Brasil ocupou a terceira posição mundial em relação ao efetivo de vacas ordenhadas (atrás da Índia e União Europeia) e a sexta posição na produção de leite (atrás da União Europeia, Estados Unidos, Índia, China e Rússia). Neste panorama, a Região Sul do Brasil ocupou a primeira posição, com 35,2% da produção nacional, destacando-se o Estado do Paraná, que figurou na segunda posição nacional em produção de leite.

No período de 1985 à 2015 houve uma evolução do efetivo de bovinos em, praticamente, todas as grandes regiões do país, com destaque para as regiões Norte e Centro-Oeste. De acordo com o IBGE (2015), ocorreu um deslocamento da produção de bovinos para o norte do país, que se deve, em parte, aos baixos preços das terras, disponibilidade hídrica, clima favorável, incentivos governamentais e abertura de grandes plantas frigoríficas. Entretanto, nas regiões Sul e Sudeste, observou-se uma estagnação, o qual contribui para o deslocamento desta para as demais regiões. Na Figura 1 pode-se observar a evolução do rebanho bovino nessas cinco regiões brasileiras.

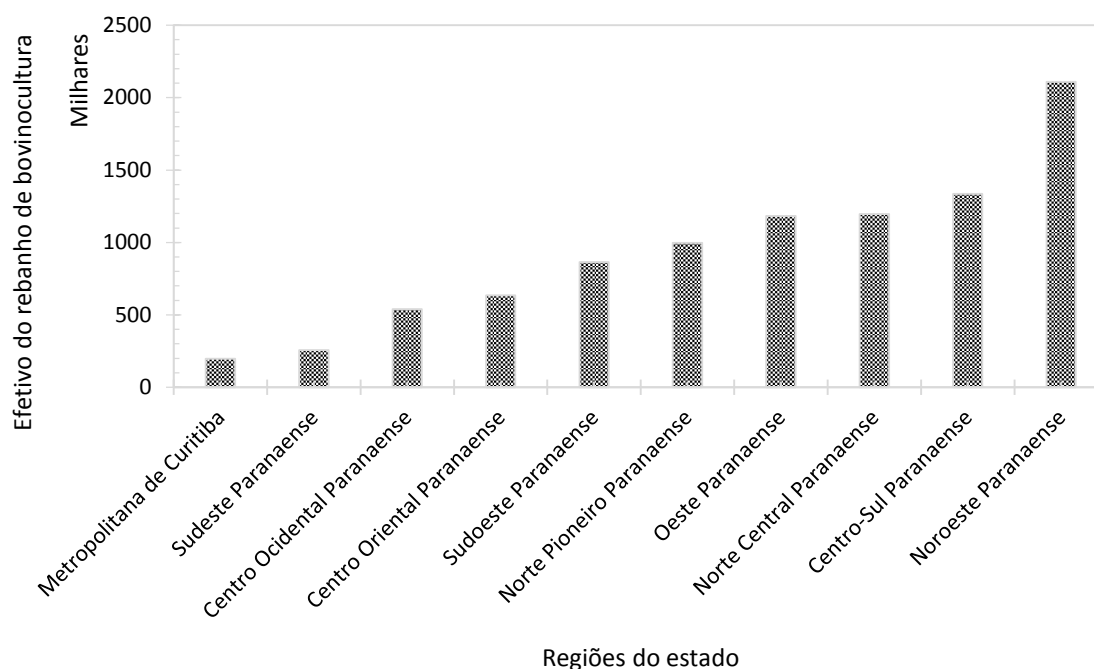
Figura 1 – Evolução do efetivo bovino (em milhões de cabeças), segundo as grandes regiões no período de 1985-2015.



Fonte: IBGE (2015).

Neste contexto, pode-se destacar que no Estado do Paraná, em quase todas as regiões, a atividade leiteira está devidamente implantada, contando ainda com qualidade genética dos plantéis de vacas leiteiras e o emprego de tecnologias de ponta nas propriedades, onde notabiliza o manejo adequado, a produção de forrageiras e a qualidade nutricional (SEAB, 2014). Machado et al. (2009), citam um outro fator importante na transformação dessas propriedades relacionado a adoção de sistemas intensivos de produção, que resultam cada vez mais, em áreas de confinamentos menores, mas, com elevado número de animais.

Na Figura 2, verifica-se o rebanho bovino paranaense, dividido pelas regiões do Estado.

Figura 2 – Rebanho bovino por regiões do Estado do Paraná.

Fonte: Adaptado de (SEAB, 2014).

Do estado do Paraná, destaca-se a Região Oeste, que é uma importante e tradicional região, onde estão localizados os municípios de Toledo e Marechal Cândido Rondon (SEAB, 2014) na produção leiteira.

Em sistemas de confinamento de bovinos leiteiros, o volume de dejetos produzidos diariamente é significativo. Na Tabela 1, são apresentadas estimativas de produção de resíduos para atividade de bovinocultura leiteira. Além do grande volume de dejetos, eles são ricos em matéria orgânica e agentes patogênicos, dessa forma, seu manejo inadequado pode acarretar a poluição de águas superficiais e subterrâneas (AMARAL et al., 2004), além de desconforto e perigo à saúde (BUENO, 2010).

Tabela 1. Geração de resíduos na bovinocultura leiteira.

Autor	Origem do resíduo	Quantidade	Unidade
Coldebella (2006)	Bovino – 600 kg	50	L.dia ⁻¹
Machado (2009)	Bovino – 500 kg	10-15	kg.dia ⁻¹
Pereira et al. (2015)	Bovino de leite	12,5	kg.dia ⁻¹

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Roston e Silva (2009), destacam ainda outra grave consequência que está relacionada com a demanda de oxigênio no meio aquático, resultado da formação de sais minerais dissolvidos na água, principalmente, nitrogênio e fósforo, cuja presença leva ao desenvolvimento de algas e, conseqüentemente, a eutrofização de rios, riachos, lagos e lagoas.

De acordo com Thomann e Mueller (1987), a eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas quanto aderidas, a níveis tais que sejam consideradas como causadores de interferências mediante os usos desejáveis do corpo d'água.

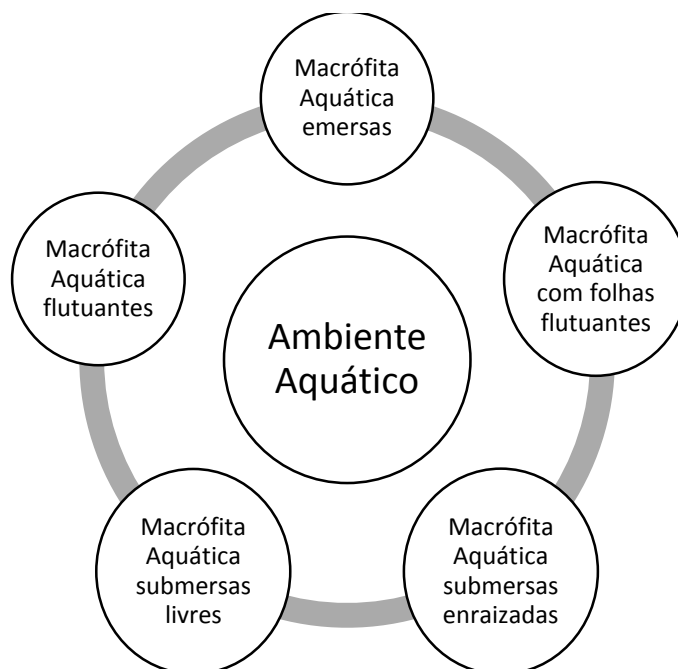
Nogueira et al. (2015) descrevem a eutrofização de um corpo d' água, por meio do aumento excessivo de nutrientes na água, decorrentes do carreamento de fertilizantes agrícolas, águas pluviais e detergentes. E concluem que, o processo de eutrofização a partir do aumento das atividades humanas tem se tornado cada vez mais impactantes em relação à qualidade das águas. Para Carvalho (2004), a eutrofização quando controlada, denominada de eutrofização acelerada ou antrópica, possui papel importante na piscicultura. A reprodução das condições eutróficas, permite a multiplicação de algas que servem de alimento para os microcrustáceos, que por sua vez, constituem o alimento das larvas da maioria dos peixes.

No entanto, há quem veja a conversão desses nutrientes em uma valiosa biomassa vegetal. Para Xu e Shen (2011), essa conversão tem atraído cada vez mais atenção, pois, além de abordar sua poluição, fornece também uma maneira rentável de reciclar os nutrientes através da produção de uma variedade de produtos de valor agregado.

2.2 BIOMASSA VEGETAL

As plantas aquáticas, também conhecidas como macrófitas, do latim (*macro* = grande, *fita* = planta) são em sua maioria, vegetais terrestres que se adaptaram ao ambiente aquático. Há cinco diferentes grupos ecológicos baseados em seu modo de vida no ambiente aquático (Figura 3) (UFSCAR, 2016).

Figura 3 – Classificação dos grupos de macrófitas no ambiente aquático.



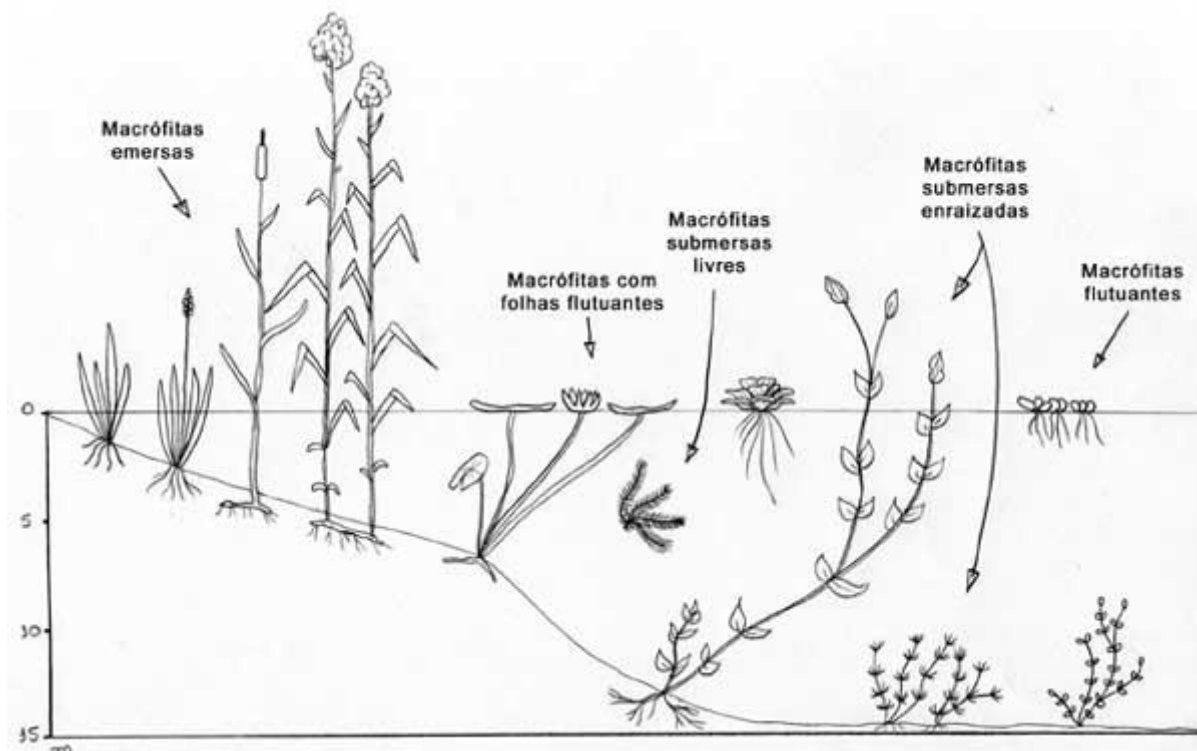
Fonte: Adaptado de UFSCAR (2016).

Esses grupos podem ser caracterizados da seguinte forma:

- Emersas: enraizadas no sedimento, porém as folhas crescem para fora da água. Ex: Junco, Taboa;
- Macrófitas aquáticas com folhas flutuantes: enraizadas no sedimento e com folhas flutuando na superfície da água. Ex: Lírio d'água, Vitória-régia;
- Macrófitas aquáticas submersas enraizadas: enraizadas, crescendo totalmente debaixo d'água. Ex: Elódea, Cabomba;
- Macrófitas aquáticas submersas livres: Permanecem flutuando debaixo d'água. Podem se prender a pecíolos e caules de outras macrófitas. Ex: Utriculária;
- Macrófitas aquáticas flutuantes: Flutuam livremente na superfície da água. Ex: Alface d'água, Aguapé, Orelha-de-rato.

Na Figura 4 é apresentada uma imagem, que ilustra a forma dos cinco grupos de macrófitas no ambiente aquático.

Figura 4 – Ilustração dos cinco grupos de macrófitas aquáticas.



Fonte: USFCAR (2016).

De acordo com Jandl (2010), as macrófitas possuem crescimento rápido e facilidade na proliferação, sendo as espécies mais conhecidas a *Eichhornia crassipes* (aguapé), a *Pistia stratiotes* (alface d'água) e a *Salvinia molesta* (samambaia aquática). A Salvinia, que pertence ao grupo das macrófitas flutuantes, de acordo com Pereira et al. (2011), é nativa da América do Sul, especificamente do Sudeste do Brasil. Elas formam uma cobertura densa em lagoas e rios lentos, causando perdas econômicas e problemas ambientais para espécies nativas e comunidades biológicas.

Conforme Thomaz e Bini (2003), o alto potencial de crescimento desses vegetais, aliado às altas temperaturas e às condições nutricionais, indicam a relevância dessa plantas como fontes de detritos, ocorrendo principalmente em regiões tropicais.

Cui e Cheng (2014), destacam que, as plantas aquáticas possuem um potencial enorme para produção de energias alternativas, como: etanol, butanol e, principalmente, biogás. Suas principais vantagens estão relacionadas à absorção de elevadas taxas de nutrientes e ao alto rendimento de biomassa. Para Salerno, Nurdogan e Lundquist (2009), há ainda, o benefício da dispensabilidade de terra

arável ou água doce para sua produção e também pela produtividade de biomassa, cerca de $70 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ de peso seco livre de cinzas.

As macrófitas podem ter seu crescimento afetado por meio da manipulação de condições de crescimento como pH e concentrações de fosfato e nutrientes no meio, tornando-a uma matéria prima de elevado potencial para a produção e utilização em fontes de energias renováveis (CUI e CHENG, 2014) e também pela aclimatação da comunidade microbiana, o qual poderá melhorar o seu rendimento. Na Figura 5 observa-se uma lagoa contendo uma elevada quantidade das macrófitas da espécie *Salvinia*.

Figura 5 – Exemplo de lagoa com elevada quantidade de macrófitas em sua superfície.



Fonte: Próprio autor.

As macrófitas do grupo das flutuantes se estabelecem em superfícies de águas doces ou com pouca salinidade (de até 4 g L^{-1}), protegidos de ventos fortes e sem correntezas. É comum a formação de densas populações, flutuando livremente sobre a superfície de lagoas ricas em matéria orgânica (Figura 5), sendo dispersas por aves aquáticas e correntezas (LANDOLT; KANDELER, 1987; THOMAS, 2002).

De acordo com Skillicorn et al. (1993), estas possuem crescimento rápido, dobrando sua biomassa entre 2 a 3 dias, quando em condições ideais.

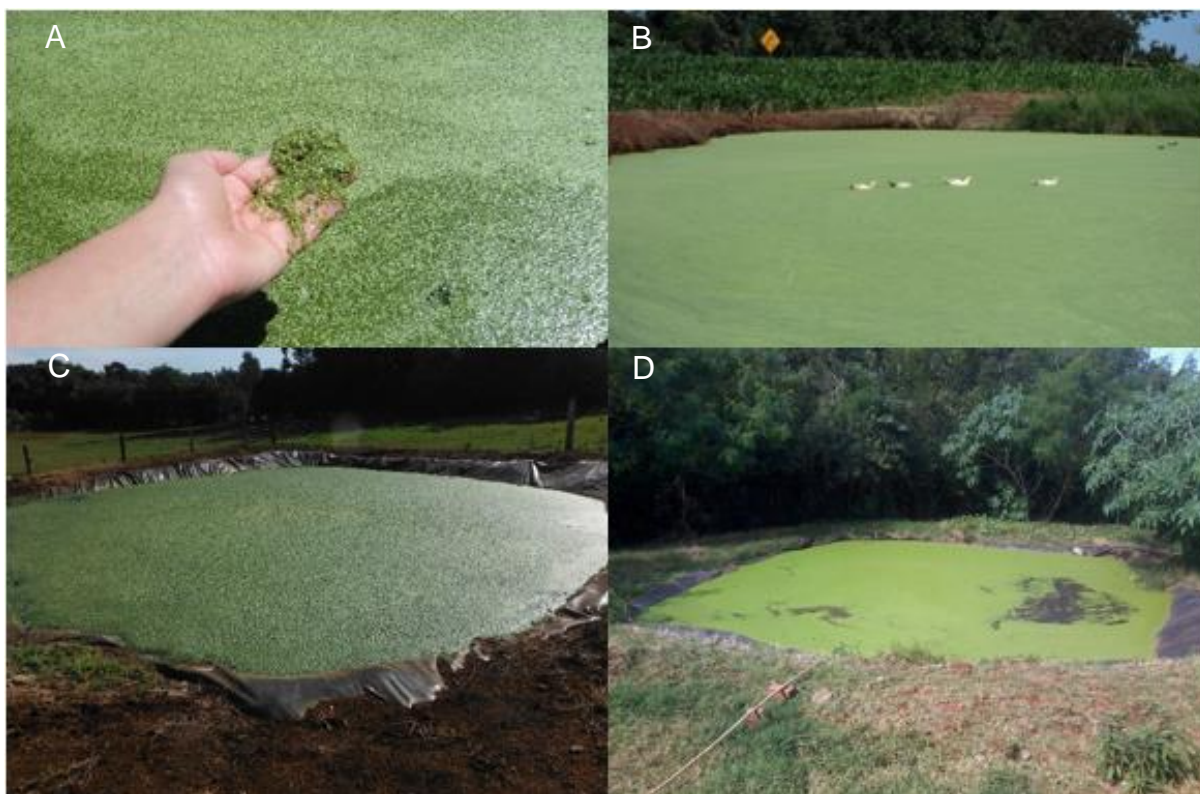
2.2.1 Macrófitas na Região Oeste do Paraná

A região oeste do Paraná, tem grande importância em razão da diversidade da produção agrícola e agropecuária. A região conta também com a Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional, maior produtora de energia limpa e renovável do mundo. Em 2016, produziu um total de 103 milhões de Megawatts-hora (ITAIPU BINACIONAL, 2017a).

Seu reservatório que foi construído no leito do Rio Paraná, possui uma área de 1.350 km² de área inundada. Sendo, seu índice de produção de 10,4 MW por km² (ITAIPU BINACIONAL, 2017b). Uma grande área de interesse para Itaipu que drena parte da rede hidrográfica do território paranaense diretamente ao reservatório é a Bacia do Paraná III. Esta bacia, (Figura 6) possui uma área de 8.000 km² e conta com 28 municípios do estado do Paraná e um do Mato Grosso do Sul (ITAIPU BINACIONAL, 2017c).

De acordo com o Programa Cultivando Água Boa da Itaipu Binacional, desde a sua criação, em meados de 1982, começaram a aparecer passivos ambientais, como a contaminação das águas com dejetos de animais, agrotóxicos, esgotos e lixos. E percebeu-se que o impacto não atingia somente as águas, mas, principalmente nas comunidades em seu entorno (CULTIVANDO ÁGUA BOA, 2016).

Figura 7 – Lagoas contendo elevadas quantidades de macrófitas. Imagem de uma espécie de macrófita (A). Imagem de uma lagoa localizada no município de Pato Bragado-PR (B). Imagem de lagoas localizadas no município de Marechal Cândido Rondon-PR (C e D).

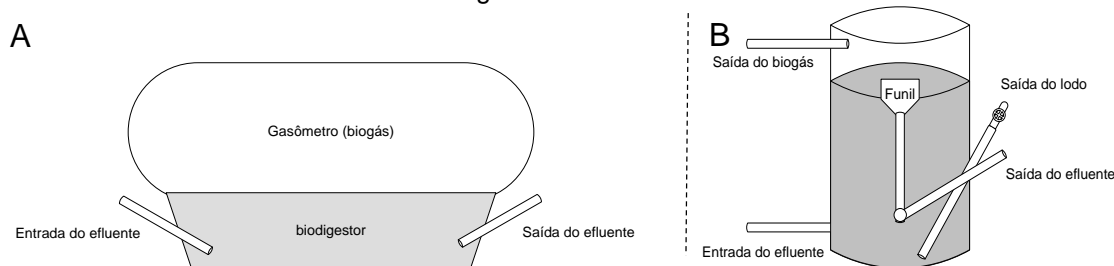


Fonte: Próprio autor.

2.3 PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA E CODIGESTÃO

Conforme Chernicharo (1997), uma alternativa eficiente para o tratamento de resíduos de composição predominantemente orgânica é a biodigestão anaeróbia ocorrida em biodigestores. Além do tratamento do resíduo, há o aproveitamento da produção de biogás na geração de energia e do digestato, que trazem ganhos econômicos, ambientais e sociais (LINS, MITO e FERNANDES, 2015). Na Figura 8, pode-se observar o esquema de dois modelos de reatores denominados de biodigestores, o canadense e o de fluxo ascendente.

Figura 8 – Ilustração de biodigestores: (A) Ilustração de um biodigestor canadense; (B) Ilustração de um biodigestor de fluxo ascendente.



Fonte: Próprio autor.

A biodigestão anaeróbia, conforme Chernicharo (1997), pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfúrico e amônia, além de novas células bacterianas.

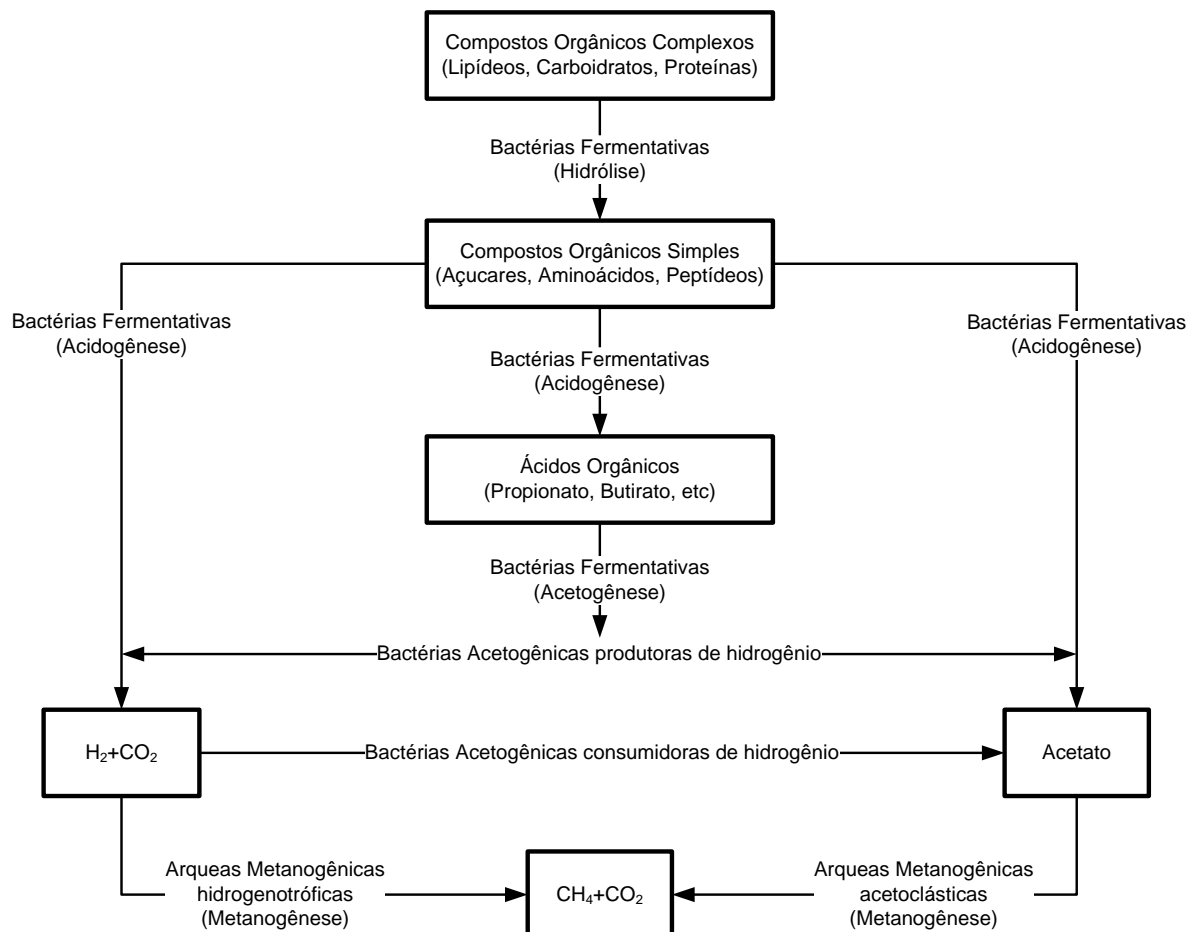
Os resíduos orgânicos, geralmente são compostos por moléculas grandes, constituindo sua cadeia em carboidratos, proteínas, lipídeos e celuloses. Esses compostos orgânicos são hidrolisados com bactérias anaeróbias, onde atacam as moléculas pequenas, como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos, bem como, uma pequena quantidade de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono na hidrólise, alterando para ácidos graxos. Os ácidos graxos são completamente degradados em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono durante a acetogênese. O processo de digestão anaeróbia está completo, quando o hidrogênio e o ácido acético são convertidos em metano durante a metanogênese (CUI e CHENG, 2014).

Diante disto, observa-se a importância da hidrólise no processo da produção de biogás. Na Figura 9 é possível verificar, a rota metabólica e grupos microbianos na digestão anaeróbia. Chernicharo (1997) descreve que, a digestão anaeróbia contempla um sistema ecológico delicadamente balanceado, com processos complexos e etapas sequenciais. Por este motivo, alguns fatores podem afetar a produção de biogás, tais como: temperatura operacional do reator, tempo de residência do substrato no reator, composição do substrato (ex. teores de lignina, carboidrato, proteína e gordura), tamanho das partículas e pH do meio.

Como resultado do processo descrito na Figura 9, há a geração do biogás como uma mistura de, principalmente, metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O biogás, dependendo de sua composição e poder calorífico, pode ser aproveitado tanto em sua queima direta (aquecedores, fogões, caldeiras, etc.) como também, para a produção de simultânea de energia elétrica e térmica por meio da cogeração (LEMOS

e STRADIOTTO, 2012). Vale ressaltar que, a qualidade do biogás está associada à origem da biomassa residual.

Figura 9 – Sequências metabólicas do processo de digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

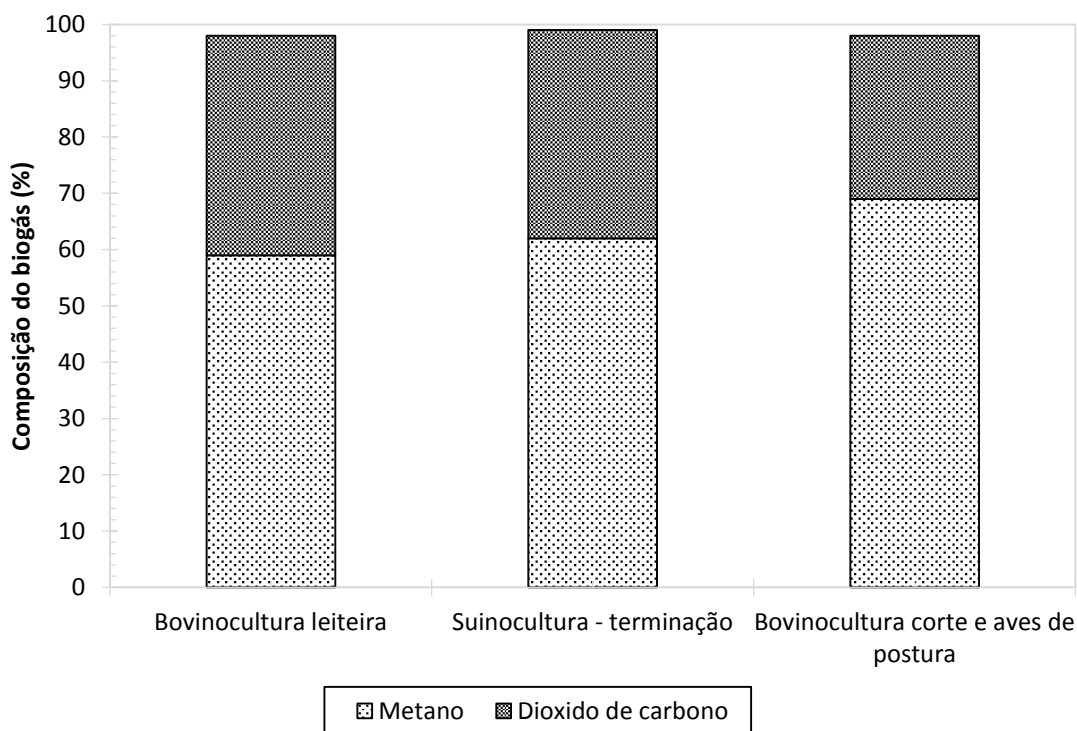
Ainda assim, há outra forma de aumentar o potencial energético de um substrato, que é por meio da codigestão. Segundo Álvarez, Otero e Lema (2010), a codigestão é definida como o tratamento anaeróbio de uma mistura de pelo menos dois tipos diferentes de resíduos, que tem o objetivo de melhorar a eficiência do processo de digestão anaeróbia. Por isso, a definição das melhores misturas resultará na maximização da produção de metano, na minimização da inibição e na produção de plantas de biogás mais rentáveis.

Para Cui e Cheng (2014), a adição de biomassa comumente disponível e subutilizada poderia melhorar substancialmente a produção de biogás em biodigestores. Sendo que, sua adição em biodigestores, pode aumentar a produção de biogás em aproximadamente 44%. Deublein e Steinhauser (2008) destacam que,

do ponto de vista econômico, a operação em codigestão é lucrativa quando os materiais são obtidos a uma distância de 15 a 20 km. Entretanto, Álvarez, Otero e Lema (2010) apresentam uma desvantagem na codigestão, que está no equilíbrio de vários parâmetros na mistura dos substratos, como por exemplo: macro e micronutrientes, razão C:N, pH, e componentes inibidores tóxicos.

De acordo com Lins, Mito e Fernandes (2015), a composição média do biogás produzido pela digestão dos efluentes da atividade de bovinocultura leiteira é de aproximadamente, 59% de metano (CH_4), 39,1% de dióxido de carbono (CO_2) e 330 ppm de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Porém, existe uma pequena variação dependendo do tipo de biomassa. Na Figura 10 são apresentadas as composições do biogás oriundas de outros tipos de biomassa residual.

Figura 10 – Comparação do biogás da bovinocultura leiteira com o biogás proveniente do tratamento de outros substratos.



Fonte: Adaptado de Lins, Mito e Fernandes (2015).

Diversas pesquisas têm sido realizadas com intuito de avaliar o potencial de produção de biogás por meio da codigestão com outras biomassas. Fernandes et al. (2015), apresentaram resultados satisfatórios com o uso de dejetos de suinocultura misturados com silagens de culturas de aveia comercial preta, braquiária, milho safrinha e trigo.

Por este motivo, a análise de substratos em codigestão, quando realizadas em batelada, antes de serem testadas em escala real, traz importantes resultados, pois, subsidiam tomadas de decisão para futuros investimentos.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

De acordo com Chernicharo (1997), os benefícios de qualquer sistema de tratamento, somente são alcançados, de forma otimizada, se uma sequência lógica de ações forem realizadas, como: concepção, detalhamento, implementação e operação.

Quanto a operação, esta tem uma importância fundamental, pois, pode propiciar a otimização das condições operacionais e avaliar a efetividade do funcionamento do sistema de biodigestão. Chernicharo (1997), ainda destaca três tipos de monitoramento do digestor anaeróbio: monitoramento da eficiência; estabilidade, e quantidade e qualidade da biomassa.

Considerando esse monitoramento, são destacados dois tipos de análises que podem ser realizados para avaliar a eficiência da biomassa: parâmetros de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) e o ensaio de Potencial Metanogênico Bioquímico (PMB), que mede o potencial de produção de biogás de uma determinada amostra.

2.4.1 Parâmetros de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

A quantidade de sólidos em uma determinada amostra refere-se aos sólidos suspensos ou dissolvidos. De acordo com CETESB (2009), as operações de secagem, calcinação e filtração determinam as diversas divisões de sólidos presentes na água (sólidos totais, suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis) que podem ser obtidos através de métodos gravimétricos (utilizando balança analítica ou de precisão). As concentrações de sólidos voláteis em lodos de biodigestores têm sido

utilizadas para quantificar a concentração de microrganismos decompositores da matéria orgânica.

Os Sólidos Totais correspondem a matéria sólida contida na amostra e que permanece após a retirada da umidade (DIESEL et al., 2002). O teor de diluição dos dejetos pode ser determinado pela observação dos ST presentes nos dejetos (OLIVEIRA e HIGARASHI, 2006).

De acordo com Von Sperling (1995), ao submeter os sólidos a uma temperatura acima de 500 ± 50 °C, a fração orgânica é oxidada, permanecendo assim, após a combustão, a fração inerte (não oxidada). Os sólidos voláteis representam uma estimativa da matéria orgânica nos sólidos, ao passo que, os sólidos não voláteis (fixos) representam a matéria inorgânica ou mineral.

Quanto maior for a concentração de SV na alimentação diária do biodigestor, maior será sua capacidade de produção de biogás (OLIVEIRA e HIGARASHI, 2006).

Na Tabela 2, são apresentados os valores de ST e SV de biomassas como da bovinocultura leiteira, suinocultura e de macrófitas, como *Lemna* e a *Wolffia*. Observa-se que tanto para as amostras de biomassa animal quanto para a vegetal, os valores de ST e SV estão próximos. Contudo, isso não quer dizer que essas amostras possuem as mesmas características de digestão.

Tabela 2. Concentração de ST e SV de diversas biomassas.

Tipo de Substrato	ST (%)	SV (%)
Bovinicultura leiteira	4,61	68,14
Suinocultura – Terminação	4,15	67,18
Macrófita – <i>Lemna</i>	89,63	69,31
Macrófita – <i>Wolffia</i>	88,35	63,50

Fonte: Buss (2015).

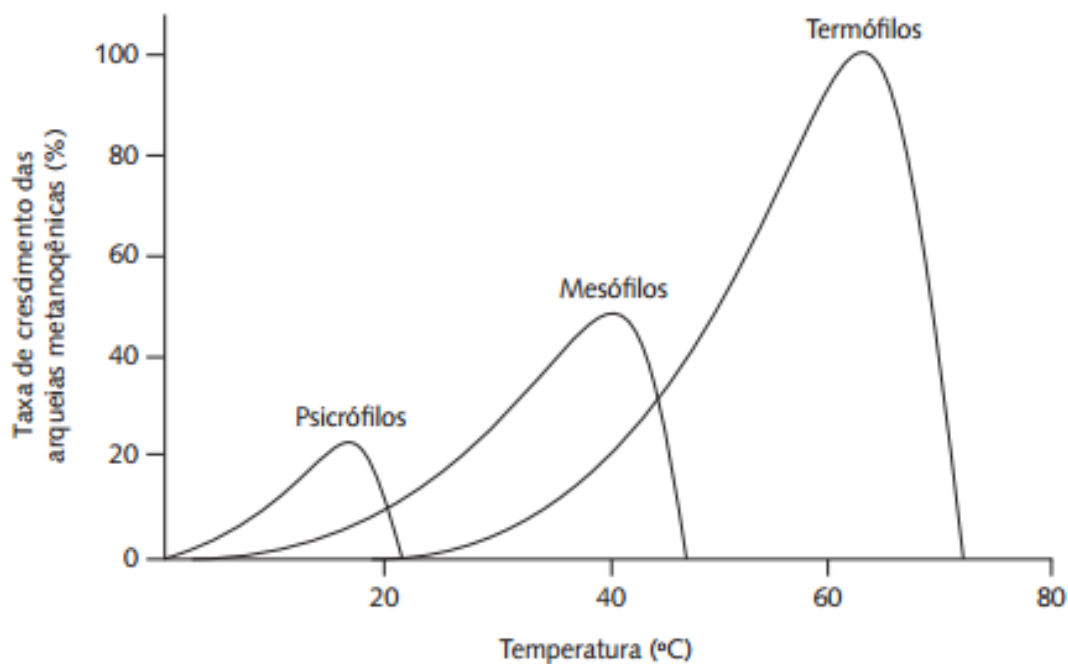
2.4.2 Produção de biogás e metano por meio de biomassa

Para estimar a produção de biogás e metano de uma determinada biomassa é realizado o ensaio do Potencial Metanogênico Bioquímico. Trata-se de um teste fermentativo, que ao final do experimento apresenta a quantidade total de biogás e metano que uma determinada amostra produziu sob certas condições de temperatura

e pressão. Sob condição padrão tem-se a produção de uma determinada quantidade de biogás, sendo que, podem chegar até 1000 L por kg de substrato. Para que ocorra esta produção é necessário que componentes orgânicos, como proteínas, carboidratos e gorduras sejam degradados biologicamente sob condições anaeróbias. Após a digestão anaeróbia do substrato é produzido o biogás. A composição do biogás está relacionada diretamente com a composição da matéria do substrato e dos parâmetros do processo de fermentação (VDI, 2006).

A produção de biogás e metano pode ser obtida por meio de um ensaio realizado em laboratório em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), conforme a metodologia estabelecida pela norma alemã VDI 4630. O material deve ser incubado em condições mesofílicas ($37,5 \pm 0,5$) °C. Para atingir tal temperatura, utiliza-se banheiras com água. (LYSON, 2011). De acordo com Fuess e Garcia (2012), temperaturas próximas da condição ótima, variam de 35 a 40 °C para o crescimento dos microrganismos mesofílicos, sobretudo das arqueias metanogênicas. Na Figura 11 pode-se observar as taxas de crescimento das bactérias metanogênicas em função da temperatura.

Figura 11 – Taxas relativas de crescimento das arqueias metanogênicas, de acordo com as faixas ótimas de temperatura.



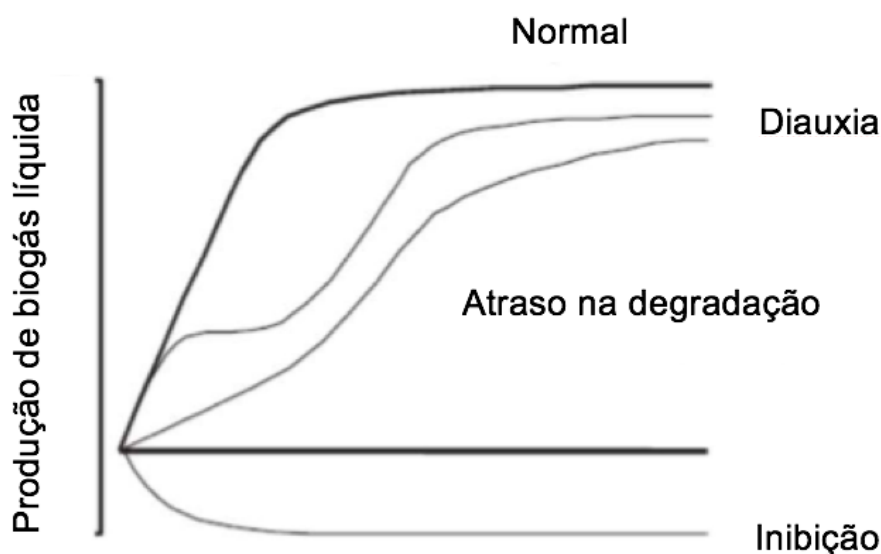
Fonte: Fuess e Garcia (2012).

Diversos fatores são monitorados e ajustados, para que, o sistema de digestão ocorra nas melhores condições. Porém, dependendo das características da biomassa e dos microrganismos, pode-se ter diferentes tipos de produção de biogás.

Na Figura 12 são apresentadas as curvas típicas da produção de biogás em frequência acumulada. De acordo com Lyson (2011), há quatro tipos de curvas que podem ocorrer durante o processo de fermentação, são elas:

- Normal: As substâncias são transformadas rapidamente em biogás e a curva de produção é caracterizada por um aumento íngreme na quantidade acumulada de biogás;
- Diauxia: A degradação pode ocorrer em duas etapas, isto pode ser devido a uma decomposição de duas fases;
- Atraso na degradação: Ocorre com substâncias difíceis de degradar (como as que contêm lignina ou lipídeos), exibem uma curva retardada de formação de gás. Esta forma de curva também pode ser devido a uma leve inibição;
- Inibição: A inibição forte ou completa resulta em uma produção de biogás negativa, ou seja, a produção de gás é menor do que a produção de gás do inóculo (que é utilizado no cálculo final da produção de biogás).

Figura 12 – Curvas típicas de frequência acumulada da produção de biogás.



Fonte: Adaptação de Lyson (2011).

Ao final do ensaio, chega-se a um importante resultado, seja ele positivo ou negativo. Desta forma, torna-se possível determinar a quantidade de biogás e metano que uma amostra de biomassa pode produzir e, com isso, estabelecer cenários com uso do biogás e a definição de recursos financeiros para implantação de plantas de produção. E mesmo que este resultado seja negativo, do ponto de vista da produção de biogás, servirá de base para a realização de outras pesquisas ou até mesmo, testar substratos alternativos.

3 OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie *Salvinia*.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a espécie de macrófita a ser trabalhada;
- Caracterizar por meio da análise bromatológica, a espécie da macrófita pesquisada;
- Caracterizar os parâmetros físico-químicos das biomassas residuais: efluente bovino e da macrófita *Salvinia*;
- Definir as quantidades de macrófita e efluente bovino a ser utilizado para a produção de biogás;
- Avaliar a produção e composição de biogás e metano de amostras de efluente bovino e macrófitas (úmida e desidratada);
- Identificar a amostra com maior potencial, se úmida ou desidratada para utilização na codigestão com o efluente bovino;
- Analisar a viabilidade de uso da macrófita *Salvinia* para a produção de biogás.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A propriedade rural identificada para a coleta das biomassas como as macrófitas, e o efluente de bovinocultura leiteira, localiza-se na Linha Ajuricaba, município de Marechal Cândido Rondon, estado do Paraná, coordenadas geográficas Lat. 24° 35' 47"S, Log. 54° 7' 55"W, altitude de 268 m (Figura 13). Trata-se de uma propriedade, a qual possui como principal atividade a produção de leite bovino.

Figura 13 – Localização da propriedade em Marechal Cândido Rondon-PR.



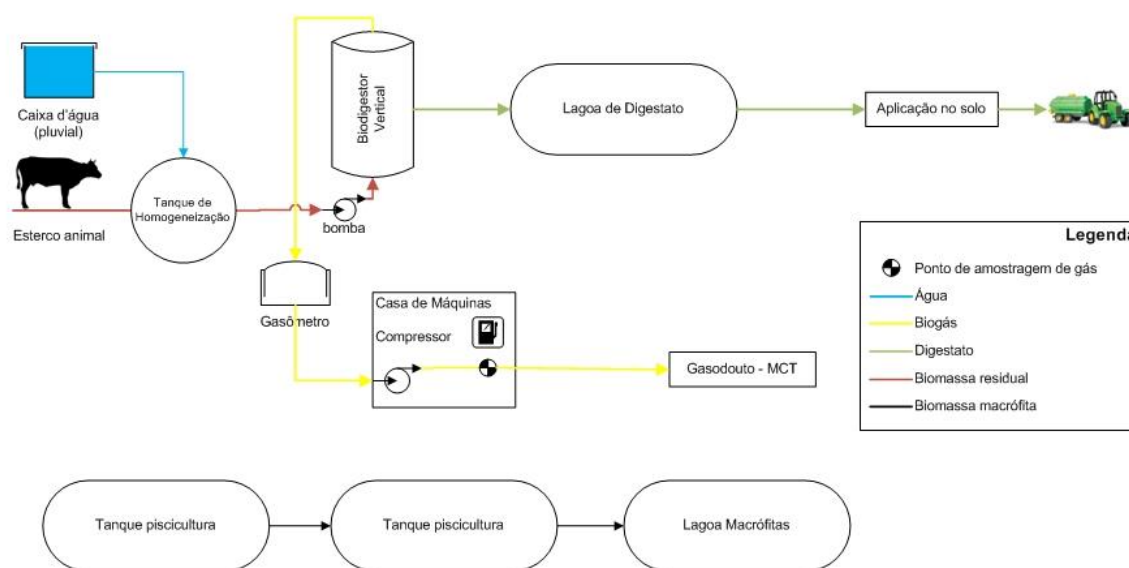
Fonte: Imagens ©2016 CNES / Astrium, dados do mapa ©2016 Google.

Esta propriedade faz parte do Projeto intitulado “Condomínio de Agroenergia para Agricultura Familiar - Sanga Ajuricaba”, o qual foi implantado pela Itaipu Binacional, em parceria com a Prefeitura Municipal de Marechal Cândido Rondon, a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI) o CIBiogás-ER, e outras instituições.

O projeto tem por objetivo a produção de biogás em 33 propriedade rurais de pequena escala com uso comum do biogás em uma Microcentral Termelétrica (MCT).

Na Figura 14, é apresentada uma ilustração do fluxo de operacionalização das atividades da propriedade, em que são contemplados o sistema de biodigestão, lagoa de digestato, armazenamento do biogás e a lagoa onde ocorre a produção das macrófitas.

Figura 14 – Ilustração do fluxo de atividades da bovinocultura leiteira.

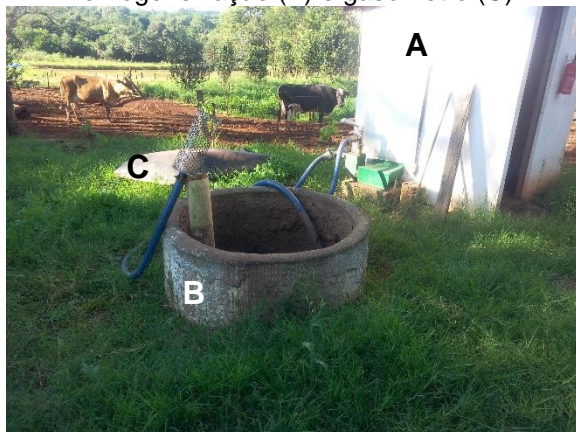


Fonte: Próprio autor.

A propriedade possui instalado um sistema de biodigestão, composto por uma caixa de homogeneização em alvenaria de 1,25 m de profundidade, 1,30 m de diâmetro, totalizando um volume de 1,65 m³, além de um biodigestor vertical com volume de 5 m³, um lagoa de estabilização e gasômetro para armazenamento do biogás. As imagens podem ser vistas nas Figuras 15 e 16.

Além do sistema de biodigestão, há ainda três lagoas, duas destinadas para piscicultura e uma, com dimensão de 17 m x 19 m x 0,80 m, totalizando 2.584 m³, que não está sem uso, e onde foram identificadas as macrófitas.

Figura 15 – Casa de máquinas (A), tanque de homogeneização (B) e gasômetro (C).



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Biodigestor vertical de fluxo ascendente. Modelo Biokohler®.

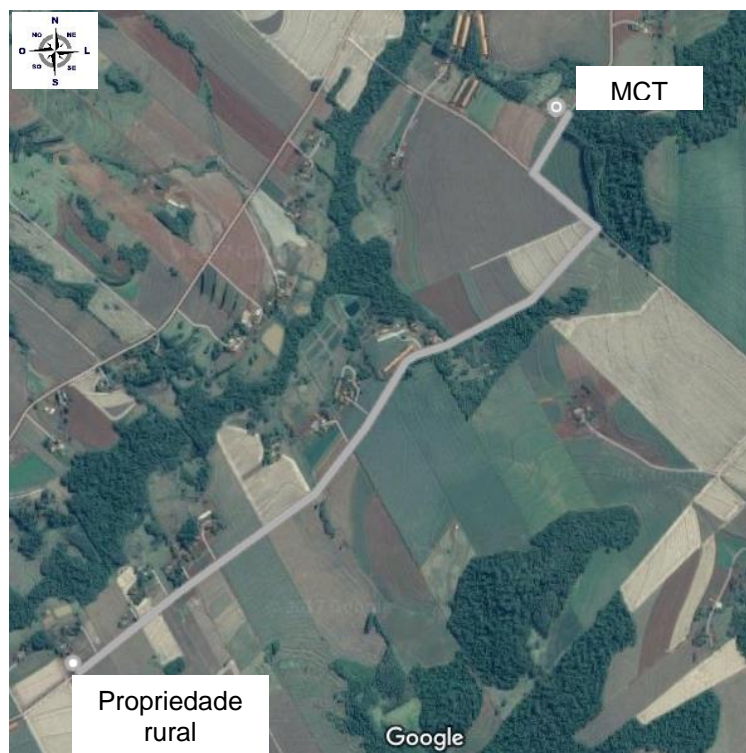


Fonte: Próprio autor.

A operacionalização das atividades da propriedade começa quando o esterco animal quando produzido é raspado pelo produtor para uma canaleta que o direciona ao um tanque de homogeneização. Neste tanque o produtor faz a diluição do esterco com água pluvial (que são coletadas por meio de calhas e armazenada em uma caixa d'água) e o direciona por meio de uma bomba para o biodigestor. Após um período no biodigestor esta biomassa que passou pelo processo de anaerobiose, e que pode ser denominado de digestato, é direcionada para a lagoa e após alguns dias, para aplicação no solo, como biofertilizante.

O biogás gerado durante esse processo é encaminhado para um gasômetro, que com a variação de sua pressão, aciona um compressor que encaminha este biogás para a Microcentral Termelétrica (MCT), localizada a aproximadamente 3 km da propriedade (Figura 17).

Figura 17 – Trajeto do gasoduto entre a propriedade rural até a MCT.



Fonte: Imagens ©2017 CNES / Astrium, dados do mapa ©2017 Google.

4.2 LABORATÓRIO PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES

O laboratório de biogás atua no estudo analítico de diferentes biomassas do Oeste do Paraná, com foco na produção de biogás. O laboratório integra o CIBiogás-ER, o qual é uma instituição científica, tecnológica e de inovação, atuando no mercado de energias renováveis com ênfase em biogás. Este laboratório possui acreditação na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005.

Foram realizados ensaios para caracterização das biomassas em relação à sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis, além do ensaio do potencial metanogênico bioquímico.

4.3 CARACTERIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS BIOMASSAS

Foram realizados ensaios a fim de se caracterizar as biomassas animal e vegetal. Como resultado dessa caracterização foram realizados os ensaios de PMB para definir a melhor opção da macrófita estudada.

As coletas foram realizadas em dois momentos: março e setembro de 2016. A primeira coleta teve por objetivo a caracterização das biomassas animal e vegetal. E a segunda coleta foi para o teste PMB de codigestão das biomassas.

4.3.1 Coleta da Biomassa Animal

As duas coletas da biomassa animal foram realizadas na caixa de homogeneização existente na propriedade, onde o dejetos bovino é direcionado e misturado com água pluvial para ser encaminhado ao biodigestor existente. Em cada amostragem foi coletado um litro de efluente. O procedimento para coleta foi realizado conforme descrição a seguir.

- Foi utilizado um frasco de plástico (2 L). Antes da amostragem, o frasco foi ambientado com amostra, sendo realizada uma 'lavagem' por três vezes. Após, essa amostra foi descartada;
- Foi realizada uma amostragem composta, sendo que durante a alimentação do biodigestor, foram coletadas porções da amostra e colocadas dentro do frasco;
- A fim de garantir sua refrigeração até o laboratório, o frasco foi acondicionado em uma caixa térmica com gelo.

4.3.2 Coleta da Biomassa Vegetal

A coleta da biomassa vegetal, ocorrida em março de 2016 foi realizada na lagoa que é destinada para macrófitas. As amostras coletadas foram acondicionadas

em sacos plásticos. A escolha da macrófita, *Salvinia* (Figura 18), que pertence ao grupo das espécies flutuantes, se deu pela elevada quantidade encontrada na região Oeste do Paraná. Onde verificou-se que, em várias propriedades que possuem um sistema de tratamento por meio de lagoas de estabilização, há a incidência desse tipo de planta, fato este que ocorre no reservatório da hidrelétrica de Itaipu, por receber vários afluentes, em função de despejos inadequados de esgotamentos sanitários e efluentes líquidos, resultando na proliferação de espécies de macrófitas.

Figura 18 – Macrófitas Salvinia.



Fonte: Próprio autor.

Após a coleta, a amostra foi dividida em duas porções: uma para secagem à temperatura ambiente (Figura 19), que denominou-se de desidratada e outra porção da amostra que não foi seca, identificada como úmida (Figura 20). Ao término da secagem da primeira porção, as amostras foram trituradas em um liquidificador industrial.

Figura 19 – Material já triturado que foi seco à temperatura ambiente.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Material já triturado que não foi seco.



Fonte: Próprio autor.

Para definição do teor de umidade foi estabelecido o peso inicial das duas porções, amostra seca ao sol e amostra seca na estufa.

A amostra seca ao sol, após pesada foi depositada em um recipiente e deixada sob o sol, sendo pesada novamente e triturada para uso no laboratório. Já as amostras secas na estufa foram acondicionadas em cadinhos de porcelana e levadas a estufa à uma temperatura de 104 °C e calculada a diferença de massa para determinar a umidade.

4.3.3 Ensaio Físico-Químicos e PMB

Afim de caracterizar as amostras do efluente bovino, e das macrófitas úmida e desidratada foram realizados ensaios de ST, SF e SV, conforme o método 2540 G (com alterações) do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22. Ed. Com base nesses resultados, foi realizado o ensaio de PMB, conforme a norma VDI 4630 (2006) a fim de conhecer o valor máximo de biogás e metano que as amostras poderiam atingir, sob condições ótimas.

Na Tabela 3, são apresentadas as amostras que foram incubadas para a realização do ensaio PMB, bem como, o teor de ST obtidos durante a caracterização das amostras.

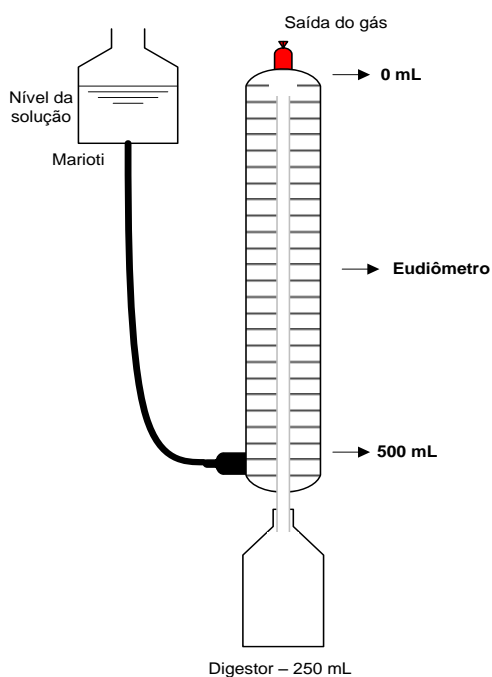
Tabela 3. Amostras que foram incubadas para o ensaio de PMB.

Amostra	Tipo do substrato	% ST
1	Efluente bovino	5,51
2	Macrófita úmida	8,14
3	Macrófita desidratada	86,64

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

No ensaio de PMB, as amostras e o inóculo foram medidos e incubados em frascos digestores de vidro (250 mL), acoplados a tubos graduados de 500 mL, denominados eudiômetros, para reproduzir o processo de biodigestão (Figura 21), com divisões de escala de 1 mL. As massas das amostras foram calculadas e medidas com base nos SV, na proporção de 1:3 (substrato: inóculo). O padrão positivo utilizado foi a celulose microcristalina Sigma-Aldrich® e o padrão negativo, o inóculo puro. O teste de fermentação foi realizado em triplicata, no regime de batelada e com temperatura controlada na faixa de $(37,0 \pm 2,0)$ °C.

Figura 21 – Ilustração do sistema contendo reator, eudiômetro e frasco de nível.



Fonte: Próprio autor.

O volume de biogás produzido durante o período de fermentação foi mensurado na escala graduada dos eudiômetros e foi normalizado na CNTP. Para medir a composição do biogás utilizou-se o analisador portátil de gases marca Dräger®, modelo X-am 7000. Os resultados foram expressos em litros normalizados por kg de sólidos voláteis ($L_N.kgSV^{-1}$). O critério estabelecido para o encerramento do experimento é o registro da produção de diária de biogás, equivalente a 1% do volume total do biogás produzido.

4.3.4 Ensaio de Celulose, Hemicelulose e Lignina para Macrófita

Outro aspecto analisado, foi a análise bromatológica dos resíduos vegetais da macrófita desidratada: celulose, hemicelulose e lignina. Estes compostos determinam os tipos dos compostos intermediários formados. Este ensaio foi realizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE.

4.4 ENSAIOS PARA CODIGESTÃO DO EFLUENTE BOVINO COM MACRÓFITA

Com base nos resultados da caracterização físico-química e PMB das amostras, foi identificada a amostra para a realização do ensaio de PMB em codigestão. Contudo, foi necessário a realização de nova amostragem na propriedade rural, e por isso, novos ensaios de ST, SF e SV foram realizados, antes do ensaio de PMB em codigestão.

4.4.1 Coleta da Biomassa Animal

A coleta para os ensaios de codigestão foi realizada no mês de setembro de 2016. Não houve modificações na metodologia de amostragem também realizada para outros experimentos.

4.4.2 Coleta da Biomassa de Origem Vegetal

A nova coleta foi realizada no mês de setembro de 2016. As macrófitas foram submetidas a uma rápida lavagem com água corrente, a fim de remover vestígios de solo fixados nas folhas e raízes da planta. Na coleta realizada em março/2016, não foi necessário proceder essa lavagem, pois, as plantas não continham resíduos. Em seguida, foram acondicionadas em recipientes para secagem ao sol. Após secas (Figura 22), foram trituradas em um liquidificador e disponibilizadas para os ensaios.

Figura 22 – Macrófita parcialmente seca (A). Material seco e triturado, pronto para a realização dos ensaios laboratoriais (B).



Fonte: Próprio autor.

Após a definição do estado da macrófita, se seria utilizada úmida ou seca, foi necessário novamente a realização dos ensaios de ST, SV e SF, em razão da nova amostragem.

Com base nos resultados de caracterização, além da amostra de efluente bovino e da macrófita, foram preparadas mais quatro amostras, denominadas de

Mistura 1, 2, 3 e 4, para a realização do ensaio de PMB. O objetivo destas misturas foi adicionar uma quantidade de efluente bovino junto à macrófita (codigestão). As misturas se deram em função da alteração da massa utilizada de cada amostra (efluente bovino + macrófita) resultando na percentagem final de ST. Portanto, foram incubadas as seguintes amostras: macrófita seca, efluente bovino, Mistura 1 (6% ST), Mistura 2 (7% ST), Mistura 3 (8% ST) e Mistura 4 (9% ST). Seguiu a mesma metodologia de incubação para fermentação das amostras. O experimento teve duração de 30 dias. As amostras ensaiadas podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4. Amostras que foram incubadas no laboratório para o ensaio de PMB de codigestão.

Amostra	Tipo de Substrato	% ST
1	Celulose cristalina	N.A.
2	Macrófita	92,94
3	Efluente bovino	5,29
Mistura 1	Efluente bovino + Macrófita + inóculo	6
Mistura 2	Efluente bovino + Macrófita + inóculo	7
Mistura 3	Efluente bovino + Macrófita + inóculo	8
Mistura 4	Efluente bovino + Macrófita + inóculo	9

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

N.A. – Não aplicável

Os valores correspondentes à percentagem de ST ou MS (matéria seca) para as misturas, foram obtidos por meio das equações 1 e 2.

$$MS_{mistura} \% = \frac{MS_{bovino} + MS_{macrófita}}{100} \quad (01)$$

$$MS_{final} \% = \frac{MS_{mistura} \cdot 100}{MS_{bovino} + MS_{macrófita}} \quad (02)$$

Onde:

MS_{bovino} = resultado do ensaio de sólidos totais do efluente bovino.

$MS_{macrófita}$ = resultado do ensaio de sólidos totais da macrófita.

4.4.2.1 Determinação do poder calorífico inferior do biogás gerado durante o ensaio de PMB

O Poder Calorífico Inferior (PCI) foi determinado por meio da fórmula de Dulong (SILVA, CORREIA e HERMETO, 1985), conforme a equação 3.

$$PCI = \sum_{i=1}^N PCI_{gás\ i} \cdot \%m_i \quad (03)$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹)

PCI_{gás} = Poder calorífico inferior do gás analisado (kcal.kg⁻¹)

%m_i = fração mássica

$$\%m_i = \frac{y_i \cdot MM_i}{\overline{MM}} \quad (04)$$

Onde:

%m_i = fração mássica

\overline{MM} = Massa molecular média (g.mol⁻¹)

y_i = concentração do gás (g.mol⁻¹)

MM_i = Massa molar do gás

Massa molecular média

$$\overline{MM} = \sum_{i=1}^N y_i \cdot MM_i \quad (05)$$

Onde:

\overline{MM} = Massa molecular média (g.mol⁻¹)

y_i = concentração do gás

MM_i = Massa molar do gás (g.mol⁻¹)

Na Tabela 5, são apresentados os valores do PCI_{gás} utilizado na equação 3, conforme estabelece a norma ASTM 3588 (1998).

Tabela 5. Poder calorífico inferior de cada componente do biogás.

Componente	PCI (kcal.kg ⁻¹)
CH ₄	11.950
H ₂ S	3.630
H ₂	28.660

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Para converter o PCI de kcal.kg⁻¹ para kcal.m⁻³, utilizou as seguintes equações, com base nas condições de referência estabelecidas pela Resolução n. 8 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP):

Densidade

$$\rho = \frac{P \cdot \overline{MM}}{R \cdot T} \quad (06)$$

Onde:

ρ = densidade do gás (kg.m⁻³)

P = Pressão = 101,325 KPa ou 1 atm

\overline{MM} = massa molecular (g.mol⁻¹)

R = constante de gases ideais = 0,08205 (atm.L.mol⁻¹.K⁻¹)

T = Temperatura = 20 °C ou 293,15 K

Conversão do PCI para kcal.m⁻³:

$$PCI_{mist} = PCI \cdot \rho \quad (07)$$

Onde:

PCI_{mist} = PCI da mistura (kcal.m⁻³)

PCI = Poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹)

ρ = densidade do gás (kg.m⁻³)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS BIOMASSAS

Para caracterização do efluente bovino e do tipo de macrófita a ser trabalhada no projeto, foram feitos ensaios de ST, SF, SV e PMB. Sendo que, as macrófitas foram avaliadas em dois tipos de amostras, úmida e desidratada.

Antes da realização destes ensaios, foi determinado a umidade das plantas, conforme observado na Tabela 6.

Tabela 6. Teor de umidade das amostras analisadas.

Amostra	Umidade (%)
Macrófita (seca ao sol)	92,9
Macrófita (seca ao sol) e levada à estufa para secagem	7,1
Macrófita Úmida (seca na estufa)	92,8

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Após a determinação da umidade, foram realizados os ensaios no laboratório. Na Tabela 7, podem ser visualizados os resultados de ST, SF e SV para as amostras de biomassa animal (dejeito bovino) e das macrófitas, úmida e desidratada.

Tabela 7. Resultados de ST, SF e SV das amostras de efluente bovino e macrófitas.

Amostra	ST (%)	SF (%)	SV (%)	Relação ST e SV (%)
Efluente Bovino	5,51±0,013	27,61±0,09	72,39±0,09	3,99
Macrófita Úmida	8,14±0,14	22,30±0,25	77,70±0,25	6,33
Macrófita Desidratada	86,64±0,09	19,37±0,61	80,63±0,61	69,86

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Baseado nos valores da relação de ST e SV (%), equação 08, e no resultado da relação de SV do inóculo e sua matéria seca, foi possível calcular a quantidade necessária para cada amostra a ser incubada com o inóculo para o ensaio de PMB.

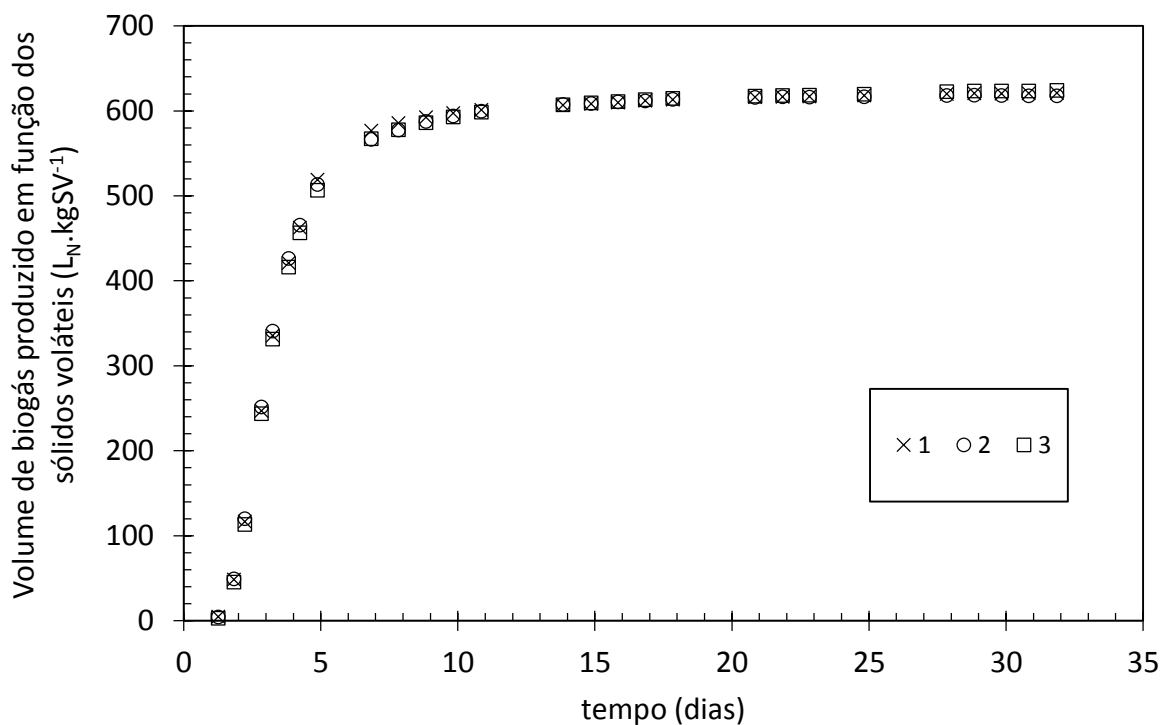
$$Relação \% = \frac{SV.ST}{100} \quad (08)$$

5.1.1 Ensaios de PMB com Celulose Microcristalina

Nos ensaios do PMB do efluente bovino e das macrófitas em codigestão é preciso, inicialmente, avaliar a atividade microbiana do inóculo a ser utilizado. Neste caso, para avaliar esta atividade foi utilizado uma substância com elevado teor de Sólidos Voláteis. Uma substância de elevado teor de SV permite estimar a capacidade de conversão da substância em biogás pelo inóculo. Normalmente, a substância padrão utilizada para avaliar o potencial do inóculo é a celulose microcristalina, que possui um potencial de produção de biogás de 740 a 750 $L_N.kgSV^{-1}$. O primeiro ensaio realizado, para a estimativa do PMB, refere-se à produção de biogás considerando apenas o inóculo e celulose microcristalina.

Na Figura 23 é apresentado o gráfico padrão com as curvas de produção de biogás de três eudiômetros, contendo o inóculo e a amostra de celulose cristalina, uma vez que o ensaio é realizado em triplicata. Os resultados dos ensaios encontram-se disponíveis na Tabela A.1 no Apêndice.

A partir dos resultados obtidos, de acordo com a norma VDI 4630, observa-se que, pelo tipo de curva, a produção foi normal, e atingiu um volume acumulado superior de 600 $L_Nbiogás.kgSV^{-1}$, o que significa que o ensaio realizado com o inóculo foi positivo, pois deveria atender a 80% do valor padrão, ou seja, 592 $L_Nbiogás.kgSV^{-1}$. Podendo-se concluir que o inóculo possui uma atividade adequada para os ensaios com o efluente bovino e macrófitas.

Figura 23 – Curva de produção de biogás da amostra de celulose cristalina.

Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Ensaio de PMB com Inóculo, Efluente Bovino e Macrófitas

A análise do PMB das amostras contendo apenas o inóculo, o inóculo e o efluente bovino, o inóculo e a macrófita desidratada e, finalmente, o inóculo e a macrófita úmida foram realizadas de acordo com as composições apresentadas na Tabela 8. Cada conjunto de 3 eudiômetros foram utilizados para a realização dos ensaios. Desta forma, o valor apresentado para o Eudiômetro A equivale à média e o desvio-padrão das massas utilizados de inóculo nos Eudiômetros A1, A2 e A3. Os mesmos procedimentos foram utilizados nos demais ensaios.

Tabela 8. Composição das amostras utilizadas nos ensaios de PMB.

Eudiômetro	Massa de Inóculo (g)	Massa de celulose microcristalina (g)	Massa de efluente bovino (g)	Massa de macrófita úmida (g)	Massa de macrófita desidratada (g)
A	200,60±0,51	-	-	-	-
B	200,91±0,97	1,71±0,01	-	-	-
C	200,37±0,38	-	41,26±0,11	-	-
D	200,96±1,38	-	-	26,28±0,35	-
E	200,55±0,20	-	-	-	2,38±0,01

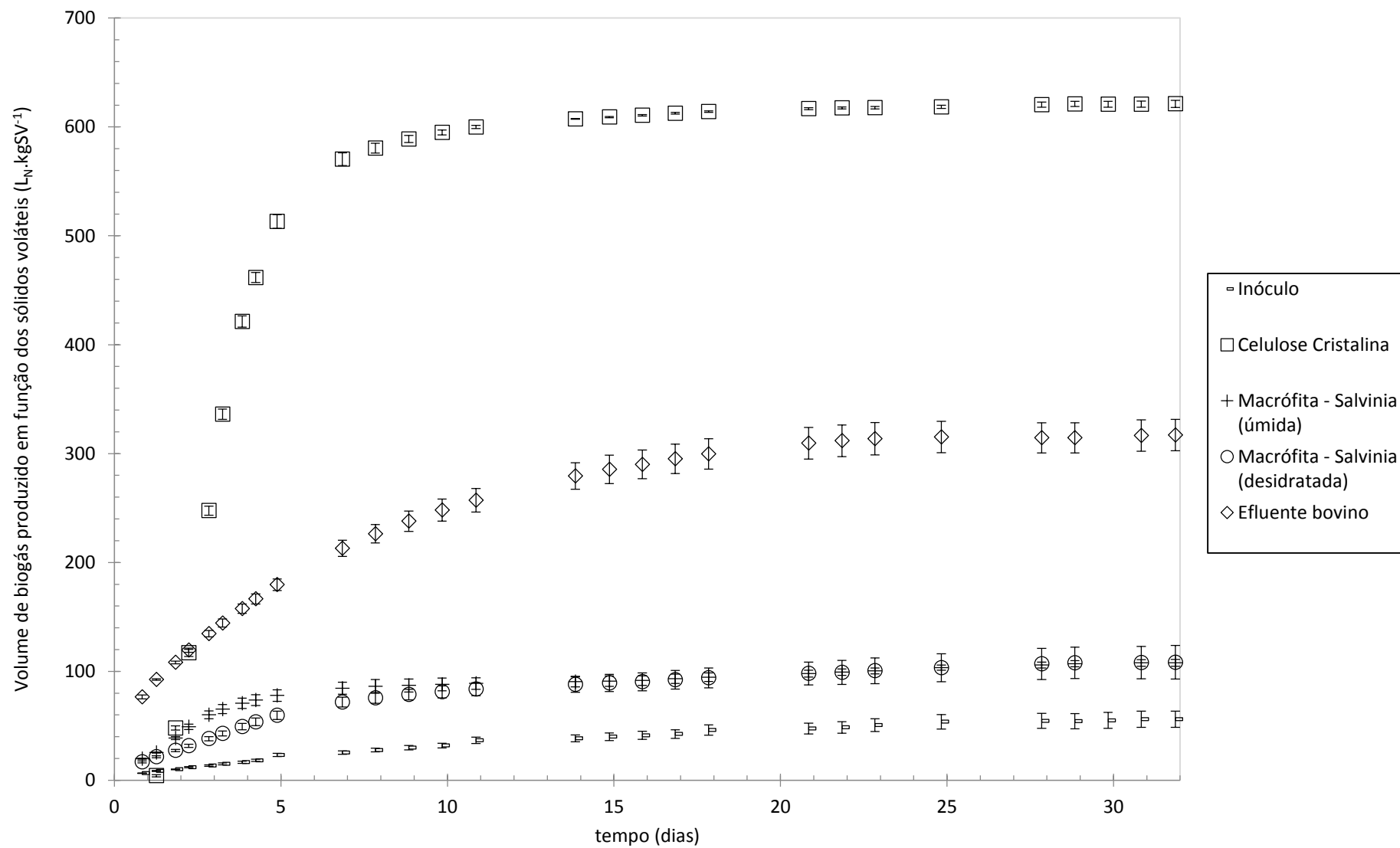
Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 24 encontram-se disponíveis na Tabela A.2 no Apêndice.

Na Figura 24 são apresentadas as curvas de produção de biogás de todas as amostras analisadas. O ensaio teve uma duração de 31 dias.

Já com relação às curvas de produção de biogás das macrófitas e do efluente bovino, em ambas amostras de macrófitas, as curvas, identificadas com diauxia, que é a decomposição em duas fases, foram parecidas. A curva da produção de biogás do efluente bovino foi identificada como sendo normal, a qual apresentou produção de biogás superior às das macrófitas.

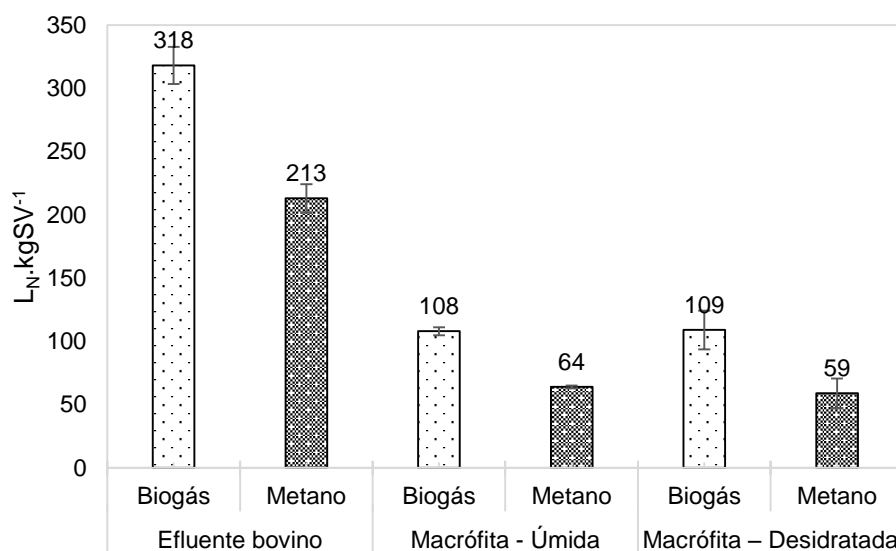
Figura 24 – Produção de biogás ao longo dos dias.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 25, são apresentados o resultado acumulado com desvio padrão, em $L_N.kgSV^{-1}$, de biogás e fração de metano, das amostras de macrófitas e efluente bovino. Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 25 encontram-se disponíveis na Tabela A.3 no Apêndice.

Figura 25 – Resultados dos ensaios de PMB da primeira fase – primeira etapa.



Fonte: Próprio autor.

Com base nas características das biomassas estudadas e nos resultados obtidos durante o ensaio, a amostra da macrófita desidratada apresentou uma produção de biogás maior do que a amostra úmida. Contudo, o desvio padrão da amostra desidratada foi de 15,3 para o biogás e 11,6 para o metano, já a amostra úmida apresentou desvio padrão de 3,1 para o biogás e 1,2 para o metano.

Diante disso, considerando valores do desvio padrão e seu potencial para a produção de biogás, decidiu-se pela amostra desidratada para uso na codigestão. Abaixo seguem alguns fatores que contribuíram para esta escolha:

- Ao utilizar a amostra desidratada no sistema de biodigestão, não ocorre a introdução de água para o sistema. A adição de plantas com umidade, poderia acarretar em uma quantidade de água indesejada dentro do biodigestor, corroborando com uma diluição da biomassa animal com a vegetal. De acordo com Oliveira, Zanuzzi e Souza (2006), o excesso de água pode reduzir o potencial fertilizante do esterco, aumentando significativamente os custos com armazenamento, transporte e distribuição. Já para Oliveira e Higarashi (2006),

a diluição dos dejetos é um dos fatores a serem considerados na estimativa da produção de biogás. Sendo que, o grau de diluição pode ser determinado pela observação de MS ou ST presentes no dejetos, quanto maior a concentração de SV na alimentação diária do biodigestor, maior será a produção de biogás. Neste caso, a quantidade de SV foi maior para a mostra desidratada, chegando a quase 81%;

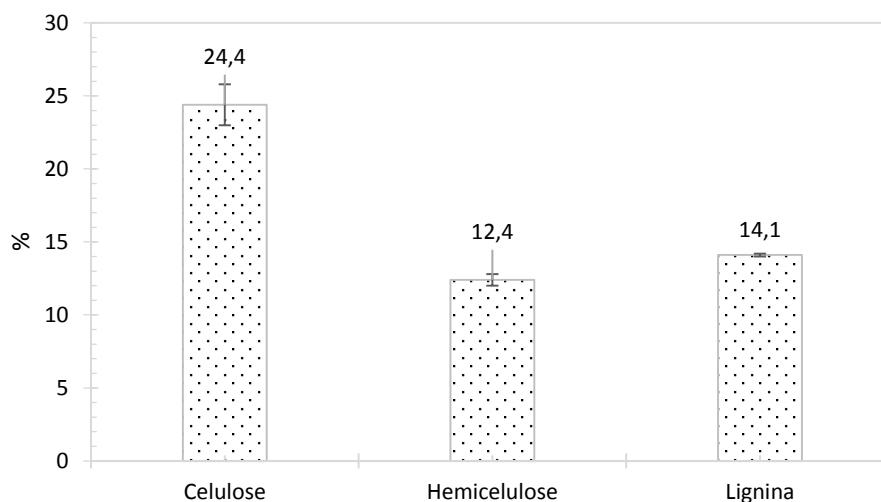
- Para se obter 1 kg SV da amostra úmida são necessários 15,80 kg MS. Já para amostra desidratada, para 1 kg SV são necessários 1,43 kg de MS;
- A área de estocagem das amostras desidratadas é menor do que para a úmida;
- Facilidade na trituração das plantas desidratadas.

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA

Os ensaios foram realizados no laboratório da UNIOESTE – Campus Cascavel. Os resultados podem ser observados na Figura 26.

A celulose em razão de sua estrutura linear de glicose, possui uma facilidade maior em sua quebra, tornando-a mais simples. Já a hemicelulose, é formada por polissacarídeos (carboidratos compostos por grande quantidade de moléculas, açúcares complexos tridimensional, sendo um pouco mais difícil de quebrar, em relação à celulose. E a lignina possui sua estrutura inquebrável, polifenol, liga a celulose a hemicelulose na parede celular e quanto o maior teor de lignina maior será a dificuldade em quebrar a parede celular.

Figura 26 – Resultados da composição de celulose, hemicelulose e lignina para a macrófita.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 26 encontram-se disponíveis na Tabela A.4 no Apêndice.

Com base nos resultados apresentados na Figura 26, observa-se que há mais celulose na composição da amostra, do que os outros componentes, estando em aproximadamente $24,4 \pm 1,4$ (%). De acordo com Deublein e Steinhauser (2008), em geral todos os tipos de biomassa podem ser usados como substratos, desde que, contenham carboidratos, proteínas, gorduras, celulose e hemicelulose como componentes principais. Quanto maior a presença de celulose e hemicelulose, melhor será o substrato para produção de biogás. Uma vez que a celulose está associada a sua estrutura linear de glicose e que serve de fonte de açúcar para os microorganismos. Diante disso, observa-se que, a amostra analisada possui uma quantidade maior de celulose do que a hemicelulose e lignina, sendo possível afirmar que, este substrato é adequado para a produção de biogás.

5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA CODIGESTÃO

Após a definição do tipo de macrófita foram realizados novamente, a coleta e os ensaios de ST, SF e SV das amostras de efluente bovino e da macrófita desidratada. Os resultados podem ser observados na Tabela 9.

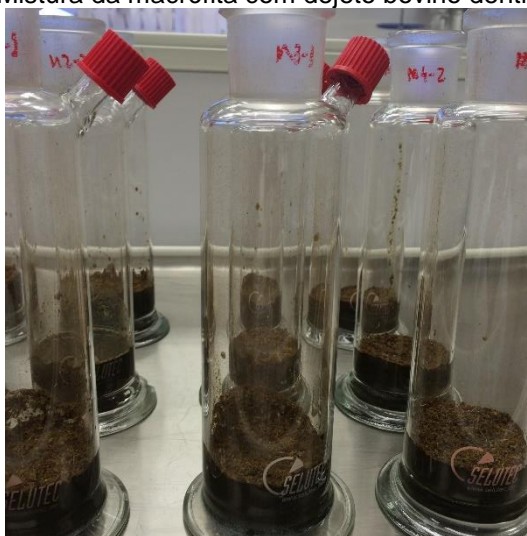
Tabela 9. Resultados de ST, SF, SV e relação de ST/SV do efluente bovino e da macrófita desidratada.

Amostra	ST %	SF %	SV %	Relação ST e SV %
Efluente Bovino	5,29±0,06	27,43±0,19	72,57±0,19	3,84
Macrófita desidratada	92,94±0,25	39,31±1,36	60,69±1,36	56,40

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Com base nesses resultados e conforme as equações 1 e 2, foram preparadas 4 misturas para codigestão que foram incubadas para o ensaio de PMB. Para o cálculo dessas misturas foram levados em consideração o teor de ST final, sendo trabalhado com um valor de ST maior do que o efluente bovino, até o limite de 9%, ou seja, foram definidos teores de sólidos de 6, 7, 8 e 9%. Foram incubadas também amostras do efluente bovino, macrófita desidratada, inóculo e celulose cristalina. O experimento teve duração de 30 dias. As imagens da incubação podem ser observadas nas Figuras 27, 28 e 29.

Figura 27 – Mistura da macrófita com dejetos bovinos dentro do digestor.



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – Digestores prontos para incubação.



Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – Digestores já acoplados aos eudiômetros.



Fonte: Próprio autor.

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas todas as massas e desvio padrão, utilizadas nos experimento, tanto para as amostras puras, como inóculo, celulose, efluente bovino e macrófita, quanto para as misturas, 1, 2, 3 e 4.

Tabela 10. Composição das amostras utilizadas nos ensaios de PMB.

Eudiômetro	Massa de Inóculo (g)	Massa de celulose microcristalina (g)	Massa de efluente bovino (g)	Massa de macrófita (g)
F	201,15 ± 1,07	-	-	-
G	203,46 ± 2,23	1,74 ± 0,02	-	-
H	202,07 ± 2,00	-	44,28 ± 1,14	-
I	206,26 ± 2,17	-	-	3,03 ± 0,06

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Tabela 11. Composição das amostras utilizadas nos ensaios de PMB.

Eudiômetro	Massa de Inóculo (g)	Mistura 1 (g)	Mistura 2 (g)	Mistura 3 (g)	Mistura 4 (g)
J	203,67±2,59	39,35±0,16	-	-	-
K	201,10±0,24	-	34,48±0,14	-	-
L	205,16±1,28	-	-	30,83±0,26	-
M	202,25±2,33	-	-	-	27,68±0,25

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

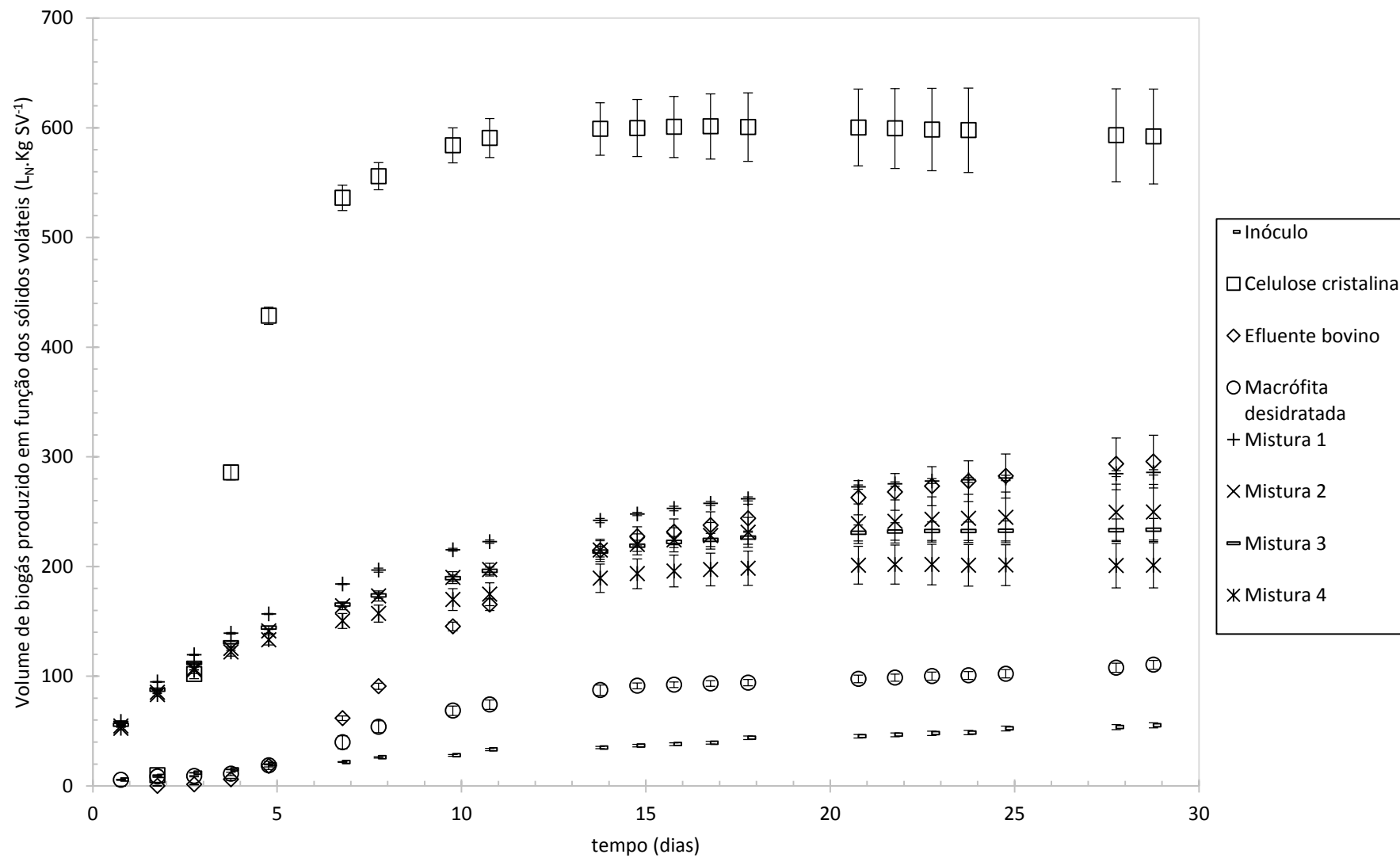
Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 30 encontram-se disponíveis na Tabela A.5 no Apêndice.

Na Figura 30, são apresentadas as curvas de produção de biogás de todas as amostras analisadas. Assim como no primeiro ensaio, a produção da celulose cristalina atingiu a produção esperada, atestando assim, a qualidade do inóculo utilizado no experimento.

Com exceção das curvas de produção do efluente bovino e da macrófita desidratada, que apresentaram curvas típicas de diauxia, as outras curvas foram identificadas, de acordo com a norma VDI, como curvas normais.

Observa-se que as curvas de produção de biogás das misturas da codigestão apresentam a mesma cinética.

Figura 30 – Curva de produção de biogás das amostras analisadas.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da média da geração de biogás e metano em $L_N.kgSV^{-1}$ e a quantidade de metano (%) produzido de cada substrato submetidos à fermentação, além do desvio padrão de cada resultado.

Tabela 12. Resultados médio da geração de biogás e metano das amostras analisadas.

Amostra	Biogás ($L_N.kgSV^{-1}$)	Metano ($L_N.kgSV^{-1}$)	Quantidade de metano (%)
Efluente Bovino	298±24,9	174±18,8	58
Macrófita Desidratada	111±4,2	48±7,1	43
Mistura 1 - 6%	286±2,9	197±5,1	69
Mistura 2 - 7%	250±25,3	178±21,6	71
Mistura 3 - 8%	234±9,6	162±11,7	69
Mistura 4 - 9%	203±18,6	143±16,3	70

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Analisando somente os substratos puros (efluente bovino e a macrófita desidratada), os resultados não foram expressivos. O efluente bovino apresentou um potencial de produção de biogás e metano de 298 e 174 $L_N.kgSV^{-1}$, respectivamente. Já a macrófita desidratada apresentou uma produção de 111 e 48 $L_N.kgSV^{-1}$, respectivamente. Contudo, Buss (2015), que também utilizou o método disposto pela VDI 4630 (2006), e que trabalhou com amostras de efluente bovino, mas, com macrófitas aquáticas das espécies *Wolffia brasiliensis* e *Lemna minuta*, encontrou resultados superiores. A produção de biogás e metano, para o dejetos bovino, apresentou uma produção inferior a 8% e 1%, respectivamente, para amostra de *L. minuta* o resultado foi de aproximadamente 49% e 114% a mais, respectivamente. Já para amostra de *W. brasiliensis* o resultado foi de 227% e 367%, respectivamente.

Outra espécie de macrófita pura testada pelo laboratório do CIBiogás-ER, e que também apresentou um resultado superior de biogás e metano foi a *Lemnaceae* com 388% e 654%, respectivamente. A comparação dos resultados obtidos neste trabalho com o de outros autores, foi realizado por meio do valor médio, pois foi este o parâmetro fornecidos por Buss (2015) e Cibiogás (2016). A comparação entre esses valores podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13. Comparativo entre autores dos resultados de PMB das amostras puras.

Amostra	Lins (2017)		Buss (2015)		CIBiogás (2016)	
	Biogás LN.kgSV ⁻¹	Metano LN.kgSV ⁻¹	Biogás LN.kgSV ⁻¹	Metano LN.kgSV ⁻¹	Biogás LN.kgSV ⁻¹	Metano LN.kgSV ⁻¹
Efluente bovino	297,50	173,92	273,0	172,39	-	-
Macrófita – <i>Salvinia</i>	111,25	47,91	-	-	-	-
Macrófita – <i>L. minuta</i>	-	-	165,35	102,74	-	-
Macrófita – <i>W. brasiliensis</i>	-	-	363,52	223,86	-	-
Macrófita – <i>Lemnaceae</i>	-	-	-	-	542,53	361,02

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Ainda com base nos resultados da Tabela 12, para as amostras da codigestão, ou seja, entre as misturas testadas, a que apresentou o maior potencial, tanto na produção de biogás, como de metano, foi a mistura 1, porém, sua produção foi inferior em quase 4% do potencial do dejetto bovino puro. Buss (2015), também realizou testes em codigestão com macrófitas aquáticas das espécies *Wolffia brasiliensis* e *Lemna minuta*, e encontrou resultados superiores para amostra de *W. brasiliensis* em relação à amostra estudada neste trabalho. O ensaio da amostra de *W. brasiliensis* + dejetto bovino, resultou em um aumento de 53% e 54% na produção de biogás e metano, respectivamente; e a amostra de *L. minuta* + dejetto bovino, resultou para ambas amostras em uma produção inferior a 46%. Para as amostras de macrófitas aquáticas, a autora determinou a adição de 1% em peso de matéria seca, conforme relação de sólidos totais contidos nas mesmas, com objetivo de aumentar o teor de ST e SV da codigestão e assim potencializar a geração de metano. Na Tabela 14, os resultados da mistura 1 são comparados os resultados de Buss (2015).

Tabela 14. Comparação dos resultados entre autores, com as amostras que sofreram codigestão.

Amostra	Lins (2017)		Buss (2015)	
	Biogás LN.kgSV ⁻¹	Metano LN.kgSV ⁻¹	Biogás LN.kgSV ⁻¹	Metano LN.kgSV ⁻¹
Mistura 1	286	197	-	-
<i>W. brasiliensis</i> + bovino	-	-	437,39	303,48

Amostra	Lins (2017)		Buss (2015)	
	Biogás	Metano	Biogás	Metano
	L _N .kgSV ⁻¹	L _N .kgSV ⁻¹	L _N .kgSV ⁻¹	L _N .kgSV ⁻¹
<i>L. minuta + bovino</i>	-	-	155,84	106,29

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

Ainda assim, de acordo com Triscari *et. al.*, (2009), que também utilizaram plantas aquáticas secas (Lemnaceae) com dejetos da bovinocultura leiteira, em 5 diferentes tipos de concentração: 0,5 a 2,0 % (massa seca), houve um aumento considerável na produção de biogás e metano, concluindo que a adição dessa biomassa aquática em conjunto com a biomassa animal em biodigestores, pode ser considerada como promissora para o aumento da produção de biogás.

Como também para Pereira et al. (2004), que trituraram e misturam 4 espécies de macrófitas: *Eichhornia crassipes*; *Eichhornia azurea*; *Pistia stratiotes* e *Salvinia* para a realização do ensaio de produção de biogás. Foi utilizado no reator, aproximadamente 1,3 kg de mistura das plantas aquáticas, onde resultaram em teores consideráveis de metano, o qual concluíram a viabilidade do seu aproveitamento, destacando ainda que sua utilização pode ser vista como uma solução para o destino adequado de grande quantidade de plantas aquáticas presentes em diversos corpos hídricos.

Outra forma de se avaliar a possibilidade de uso da amostra para produção de biogás é pelo PCI. De acordo com Lins, Mito e Fernandes (2015), o potencial energético do biogás pode ser avaliado pelo seu poder calorífico inferior, que está diretamente relacionado com o percentual de metano presente na composição do biogás.

Na Tabela 15 são apresentados os valores da composição média do biogás, obtidos durante o experimento, juntamente com os desvios-padrão. As medições ocorreram após o 7º e o 30º dia de experimento. É possível constatar que, a composição de CH₄ entre as misturas tiveram baixa variação, estando todas próximas a 60%. Já a concentração de H₂S ficou abaixo de 20 ppm, sendo considerado um ótimo resultado, já que Lins, Mito e Fernandes (2015), apresentam a composição de biogás da atividade de bovinocultura leiteira, que é de 59% (CH₄); 39,1% (CO₂) e aproximadamente 330 ppm (H₂S).

Tabela 15. Composição média do biogás durante o experimento.

Amostra	Composição do biogás				
	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	H ₂ (ppm)
Efluente bovino	55±12	27±4	1,9±0,4	11±8	92±58
Macrófita desidratada	47±15	27±3	2,4±1,0	4±1	70±35
Mistura 1 - 6%	59±2	31±4	1,8±0,4	7±3	63±45
Mistura 2 - 7%	60±3	28±5	2,0±0,3	4±2	67±47
Mistura 3 - 8%	60±2	30±3	1,8±0,3	6±2	71±48
Mistura 4 - 9%	60±3	29±3	1,9±0,5	4±2	64±49

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

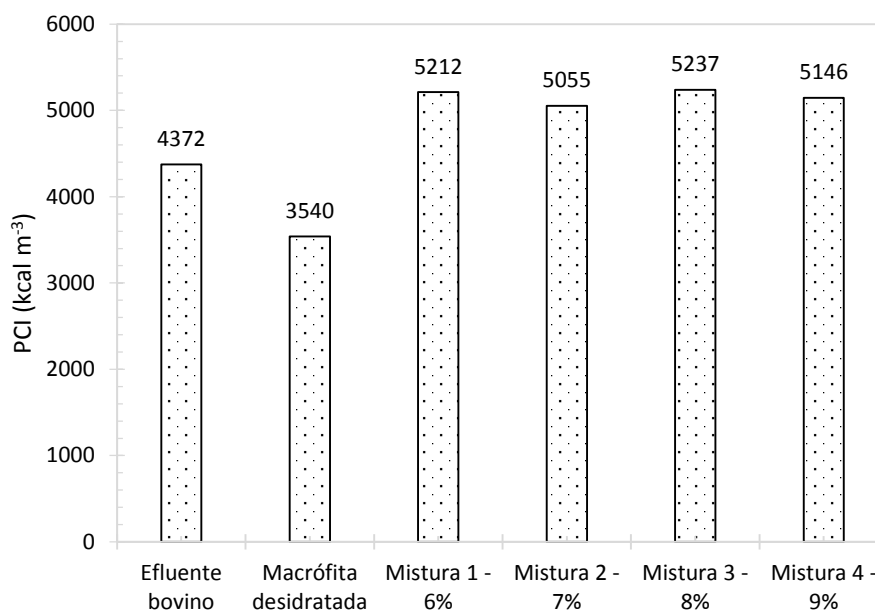
Na Tabela 16, são apresentados os valores da composição média do biogás que foram utilizados para o cálculo do PCI, além do valor do PCI_{mist} que foi obtido conforme as equações 3, 4, 5, 6 e 7.

Tabela 16. Valores da composição do biogás utilizados para cálculo do PCI e o PCI calculado.

Amostra	Composição do biogás			PCI (Kcal.m ⁻³)
	CH ₄ (%)	H ₂ S (ppm)	H ₂ (ppm)	
Efluente bovino	55±12	11±8	92±58	4372
Macrófita desidratada	47±15	4±1	70±35	3540
Mistura 1 - 6%	59±2	7±3	63±45	5212
Mistura 2 - 7%	60±3	4±2	67±47	5055
Mistura 3 - 8%	60±2	6±2	71±48	5237
Mistura 4 - 9%	60±3	4±2	64±49	5146

Fonte: Adaptado pelo próprio autor.

E na Figura 31, os valores de PCI pareados, para uma melhor avaliação. Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 31 encontram-se disponíveis na Tabela A.6 no Apêndice.

Figura 31 – Valores do PCI do biogás obtidos nas diferentes amostras analisadas.

Fonte: Próprio autor.

Quando se compara o PCI das amostras analisadas, verifica-se que a Mistura 3 possui o melhor potencial energético, cerca de, 20% acima do PCI do biogás proveniente da digestão da amostra de Efluente Bovino, o que representa uma boa condição para o uso do biogás.

Na Tabela 17, pode-se avaliar a equivalência entre o PCI do biogás do efluente bovino e da mistura 3 com o PCI de outros combustíveis.

Tabela 17. Equivalência do PCI do biogás do efluente bovino e da mistura 3 em relação à outros combustíveis.

Biogás (m ³)	Gás Natural (m ³) *	Diesel (L) **
Efluente bovino	0,4	0,4
Mistura 3	0,5	0,5

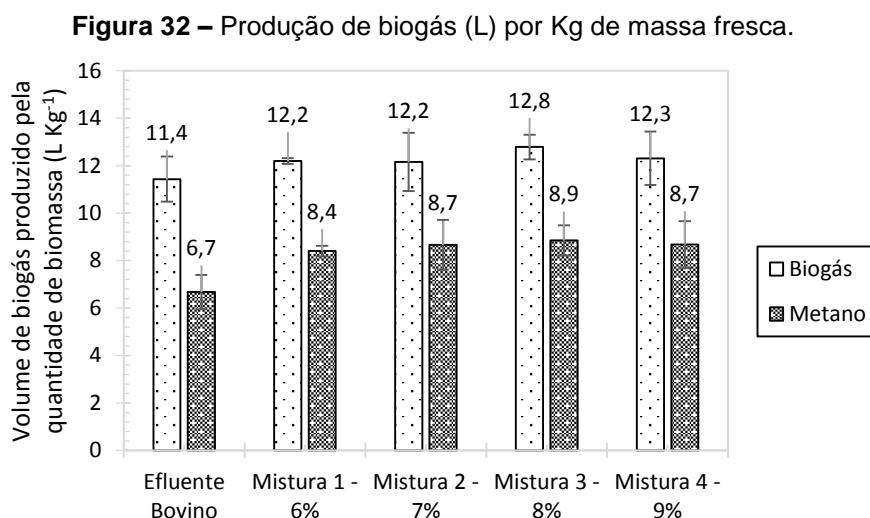
Fonte: Comgas (2014).

* PCI_{gás natural} = $9,4 \times 10^3$ kcal m⁻³

** PCI_{diesel} = $9,3 \times 10^6$ kcal m⁻³

No entanto, para uma melhor avaliação do potencial de produção de biogás, analisou-se a produção de biogás e metano em litros por quilograma de massa fresca, ou seja, quantos litros de biogás que será produzido a cada quilograma de dejetos na propriedade, em relação à quantidade de SV. Na Figura 32, são apresentados esses

valores para as amostras analisadas, exceto para amostra de macrófita pura. Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 32 encontram-se disponíveis na Tabela A.7 no Apêndice.

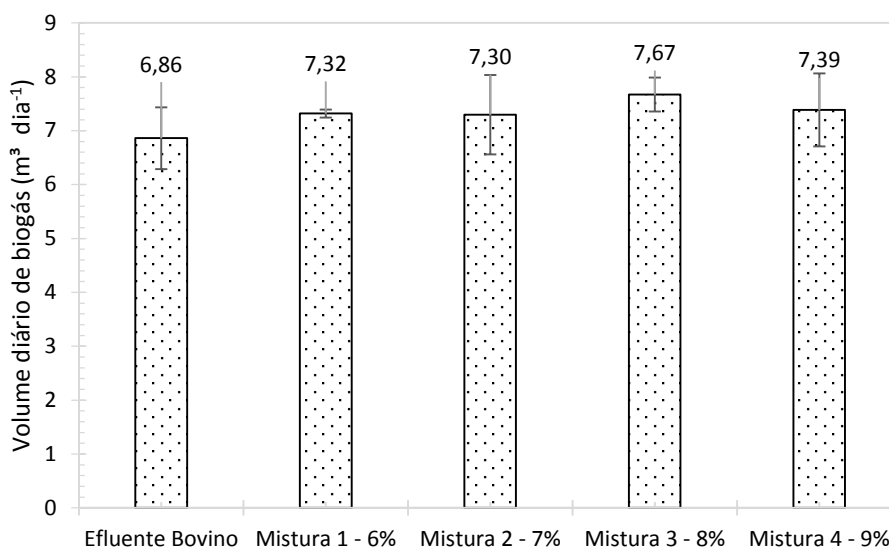


Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, diferente do encontrado quando avaliado somente a produção de biogás e metano em função da produção em $L_N.kgSV^{-1}$, a maior produção de biogás e metano foi para a amostra Mistura 3, com 12,8 e 8,9 litros, respectivamente. As outras misturas também produziram uma quantidade maior de biogás do que a amostra de dejetos bovino sem adição da biomassa, que foi de 11,4 litros, ou seja, a codigestão dos substratos aumentou o biogás.

Portanto, como a produção de dejetos na propriedade é de aproximadamente $0,6 m^3 dia^{-1}$ e a densidade do efluente bovino é de aproximadamente $1 Kg L^{-1}$, conforme Blanco et al. (2014), a estimativa de produção diária de biogás da Mistura 3 foi de $7,7 m^3$. Para a amostra de efluente bovino a produção estimada foi de $6,8 m^3$. Esses valores podem ser observados na Figura 33.

Os resultados dos ensaios utilizados para elaborar a Figura 33 encontram-se disponíveis na Tabela A.8 no Apêndice.

Figura 33 – Estimativa da produção diária de biogás (m^3) na propriedade rural.

Fonte: Próprio autor.

Verifica-se, que a estimativa da produção diária de biogás da Mistura 3 é de, aproximadamente, $7,7 m^3$, sendo 6,3% maior do que a produção de dejetos bovinos sem a adição de biomassa. Contudo, quando se avalia a possibilidade de utilização dessa mistura em escala real, verifica-se que esta diferença ($0,82 m^3$) é considerada baixa, ou seja, o resultado obtido do potencial de produção de biogás por meio da codigestão entre o dejetos bovinos e a macrófita em seu melhor potencial, não foi satisfatório, a ponto de se implantar o projeto.

Porém, essa biomassa não pode ser descartada no processo de codigestão. Deve-se avaliá-la em dejetos bovinos com teores mais baixos de ST ou em proporções maiores em sistema de biodigestão de mistura completa, por exemplo.

Segundo Amon, *et. al.* (2007), para que, se possa operar plantas de biogás com substratos em codigestão, por exemplo, de culturas energéticas, o rendimento de metano dessas culturas deve ser conhecido, pois, a composição dos nutrientes é que mostrará se o rendimento é satisfatório ou não.

6 CONCLUSÃO

Com relação ao estudo da produção de biogás a partir de resíduos da bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie *Salvinia*, concluiu-se que:

- a caracterização dos parâmetros físico-químicos das biomassas animal e vegetal foi importante para a escolha do tipo de macrófita a ser estudada, que neste caso foi a macrófita desidratada;
- com a identificação da macrófita desidratada foi possível a realização das misturas (codigestão);
- embasar-se somente nos resultados de biogás ou metano em $L_N.kgSV^{-1}$ ou PCI não é adequado, uma vez que a interpretação pode levar a conclusões divergentes;
- houve produção de biogás de todas as misturas testadas, porém, em comparação com outras espécies de macrófitas, a produção foi menor;
- avaliando toda a produção de biogás no campo poderá ser menor do que a do laboratório, uma vez que os ensaios no laboratório são realizados em ambiente controlado, e no campo, por não haver meios de controle dos fatores que estão diretamente ligados à produção de biogás, não é possível controlá-los, sem que se faça grandes investimentos financeiros, o que inviabiliza o projeto em função da produção de biogás;
- o resultado do ensaio mostrou pouca diferença na produção do biogás entre a amostra pura (efluente bovino) com a amostra da Mistura 3;
- considerando os custos de implantação do projeto, como a coleta, secagem, trituração do material, e o uso do sistema de biodigestão na propriedade rural, a utilização da planta aquática *Salvinia* em codigestão com efluente bovino, e dentro das características físico-químicas dos resíduos estudados, não é viável de implantação;
- em decorrência dos resultados, não foi possível a definição das quantidades de macrófitas e efluente bovino para um bom resultado a campo;

- a produção de biogás com outros tipos de macrófitas (*W. brasilienses* e *L. minuta*) em codigestão com efluente bovino, mostrou resultados mais satisfatórios do que com a *Salvinia*. Uma hipótese para isso, pode estar relacionada com as diferenças de cada planta, como: raiz, tamanho da folha, nutrientes.

REFERÊNCIAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP Nº 8, de 20.1.2015 – DOU 2.2.2015. Disponível em:

<<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em 20 fev. 2017.

ÁLVAREZ, J. A.; OTERO, L.; LEMA, J. M. **A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes**. *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 4, February 2010, Pages 1153-1158. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409012760>>. Acesso em 29 ago. 2013.

AMARAL, C. M. C. do et al. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, Dez. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782004000600035&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 30 Jun. 2016.

AMON, T. et. al. **Methane production through anaerobic digestion of various energy group grown in sustainable crop rotations**. *Bioresource Technology*, Volume 98, 2007, Pages 3204-3212. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406003117>>. Acesso em 28 fev. 2017.

AMORIN, A. C.; LUCAS JÚNIO, J.; RESENDE, K. T. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos obtidos nas diferentes estações do ano**. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 24, n. 1, p.16-24, jan./abr. 2004.

APHA (1999). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th Ed. Washington.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation; D 3588**. Standard practice for calculating heat value, compressibility factor, and relative density of gaseous fuels. 1998.

BLANCO, M. F. de J.; ZENATTI, D. C.; FEIDEN, A.; WEBER, R.; TIETZ, C. M.; GIACOBBO, G. Produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite e cama de aviário. Disponível em: <

revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/download/9609/7060>. Acesso em 19 jan. 2017.

BUENO, R. F. Comparação entre biodigestores operados em escala piloto para produção de biogás alimentado com estrume bovino. **Holos Environment**, v. 10, n. 1, p. 111-125, 2010.

BUSS, M. V. Macrófitas aquáticas flutuantes: avaliação e indicativo do seu potencial bioenergético. Dissertação (Mestrado em Ciência e Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Biotecnologia, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Campus Videira – Unoesc, 2015. 106 p.

CARVALHO, S. L. Eutrofização artificial: um problema em rios, lagoas e represas. **Correio de Três Lagoas**. Departamento de Biologia e Zootecnia da Unesp – Ilha Solteira. 2004. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/ctl28082004.php>>. Acesso em 14 mar. 2017.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS (CIBIOGÁS). Relatório de Ensaio 554. 2016

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo – Apêndice A: **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas** e irrigação em propriedades rurais. Dissertação de Mestrado. Unioeste, 2006 e de amostragem. 2009.

CHERNICHARO, C. A. L. (1997). *Reatores anaeróbios*. 2. Ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007. 380 p, v.5.

COLDEBELLA, A. Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica.

COMGAS – Companhia de gás de São Paulo. **Generalidades**. Disponível em: <http://www.comgas.com.br/pt/nossosServicos/orientacaoConstrucoes/Documents/rip/RIP%20-%20Regulamento%20de%20Instala%C3%A7%C3%B5es%20Prediais%20-%20Cap%202%20Generalidades%20-%202003_2014.pdf>. Acesso em 28 fev. 2017.

CUI, W., CHENG, J. J. (2015), Growing duckweed for biofuel production: a review. *Plant Biology*, 17: 16–23. Disponível em: <<http://10.1111/plb.12216>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

CULTIVANDO ÁGUA BOA (CAB). Cenário local – a bacia do paraná 3. Disponível em: <<http://www.cultivandoaguaboa.com.br/o-programa/cenario-local-a-bacia-do-parana-3>>. Acesso em 18 nov. 2016.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: An Introduction**. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH e Co. KGaA , Germany, p. 450 2008.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; e PERDOMO, C. C. **Coletânea de Tecnologias sobre Dejetos Suínos**. BIPERS – Boletim Informativo Pesquisa & Extensão. Ano 10, BIPERS n. 14, Agosto/2002.

FERNANDES, D. M. et al. **Estimativa do potencial de produo de biogás a partir da biomassa de suinocultura com culturas energéticas**. IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. Rio de Janeiro. 2015.

FUESS, L. T.; GARCIA, M . L. Qual o valor da vinhaça? **Mitigao de impacto ambiental e recuperao de energia por meio da digestão anaeróbia**. São Paulo: Editora Cultura Acadêmica, 2012. 134 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Pecuária Municipal**, 2014. Disponivel em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2015_v43_br.pdf>. Acesso em 13 jun. 2016.

ITAIPU BINACIONAL. **Gerao**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em 19 mar. 2017a.

_____. **Reservatório**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/reservatorio>>. Acesso em 19 mar. 2017b.

_____. **Rio Paraná**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/rio-parana>>. Acesso em 19 mar. 2017c.

_____. **Macrófitas aquáticas.** Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/meioambiente/macrophytas-aquaticas>>. Acesso em 19 mar. 2017d.

JANDL, O. M.. **Barriers for the employment of floating invasive weeds for biogas production in local communities in West African developing countries.** Thesis (Master in Technology, Development and Globalisation) - Department of Industrial Engineering and Innovation Sciences, Sub department of Technology, Innovation and Society, Technologische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, p. 66, 2010.

LANDOLT, E. e KANDELER. The family of Lemnaceae. A monographic study (v.2) Phitochemistry, physiology, application, bibliography. Geobotanischen Instititres Stiftung Rubel, Zurich, p. 638, 1987.

LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. Bioenergia: **desenvolvimento, pesquisa e inovação.** 1. Ed. São Paulo: Editora Cultura Acadêmica, 2012. 1069 p.

LINS, L. P; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. **Composição Média do biogás de diferentes tipos de biomassa.** <http://www.sbera.org.br/4sigera/files/4.28_JessicaYukiLimaMito.pdf>. Acesso em 14 jun. 2016.

LYSON, D. F.; REQUENA, R. E.; BAUER, A.; AMON, B.; AMON, T. **Biogas laboratory setup in Foz do Iguaçu, Brazil.** 3rd Progress Report. August 2011. Disponível em: <http://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/Anexo_12._Biogas_Lab.3erd_and_final_report.pdf>. Acesso em 26 fev. 2017.

MACHADO, C. R. et al. **PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO DEJETOS DE BOVINOS LEITEIROS COM DIFERENTES TEMPOS DE ARMAZENAMENTO COM EXPOSIÇÃO AO AR.** Disponível em: <<http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/t105.pdf>>. Acesso em 10 jun. 2016.

NOGUEIRA, P. F. et al. EUTROFIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO DA UHE FOZ DO RIO CLARO (GO). **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 30, p. 19-33, dec. 2015. ISSN 2236-2878. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/90090/107753>>. Acesso em: 14 mar. 2017. doi:<http://dx.doi.org/10.11606/rdg.v30i0.90090>.

NUVOLARI, Ariovaldo (Coord.). Esgoto sanitário, coleta transporte tratamento e reuso agrícola. São Paulo: Editora Blücher, 2003. 520 p.

OLIVEIRA, P. A. V. de; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos.** Projeto de Controle da Degradação Ambiental Decorrente da Suinocultura em Santa Catarina: Programa Nacional do Meio Ambiente II – PNMA II do Ministério do Meio Ambiente. Concórdia. 2006.

OLIVEIRA, P. A. V.; ZANUZZI, C. M. S.; SOUZA, D. O. (Coordenadores). **Gestão ambiental de propriedades suinícolas: experiência do projeto suinocultura – Santa Catarina.** 1ª Ed. Florianópolis: FATMA, 2006. 105 p.

PEREIRA, M. S.; et al. **Cálculo do potencial energético com dejetos de bovinos e suínos do departamento de zootecnia da UFSM.** XXXV Encontro Nacional de engenharia de produção. Fortaleza-CE. 2015. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_214_268_26668.pdf>. Acesso em 30 jun. 2016.

PEREIRA, R. G.; et al., **Produção de biogás a partir de plantas da biodigestão da biomassa residual de mistura de plantas aquáticas.** ICT – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis-SC. 2004. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/01/01-065.pdf>>. Acesso em 14 jun. 2016.

PEREIRA, R. G.; et al. **Production and characterization of biogás obtained from biomass of aquatic plants.** RE&PQJ, Vol.1, No.9, Maio 2011. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/icrepq'11/236-pereira.pdf>>. Acesso em 13 jun. 2016.

ROSTON, D. M.; SILVA, E. M. **Tratamento de efluentes de sala de ordenha de bovinocultura: lagoas de estabilização seguidas de leite cultivado.** I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Tratamento de Dejetos de Animais. Florianópolis. 2009.

SALERMO, M.; NURDOGAN, Y.; LUNDQUIST, T. J. **Biogas production from algae biomass harvested at wastewater treatment ponds.** Bioenergy Engineering Conference Sponsored by ASABE. Hyatt Regency Seattle, Washington, October 11-14. 2009. Disponível em: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1181&context=cenv_fac>. Acesso em 28 jul. 2016.

SEAB – SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Análise da conjuntura agropecuária.** Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/bovinocultura_leite_14_15.pdf>. Acesso 27 jun. 2016.

SILVA, J. N.; CORREIA, H.; HERMETO, C. F. *Modulo 1 – Parte A: Combustão de biomassa*. Brasília: ABEAS/CAPES/MEC, 1985. 51p (Fascículo do Curso Fontes Alternativas de Energia para a Agricultura).

SKILLICORN, P.; JOURNEY, W. K.; SPIRA, W. 1993. Duckweed aquaculture: A new aquatic farming system for developing countries. World Bank Publication. Washington, 1^oed. 1993.

THOMAS, S. M. Fatores ecológicos associados à colonização e ao desenvolvimento de macrófitas aquáticas e desafios de manejo. *Planta Daninha*, Viçosa-MG, v.20, p.21-33, 2002.

THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas**. Maringá: EDUEM, 2003.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. Person. 1^a edition. 1987.

TRISCARI, P., HENDERSON S., REINHOLD D. Anaerobic digestion of dairy manure combined with duckweed (Lemnaceae). **In 2009 ASABE Annual International Meeting**, Reno, Nevada, USA.

UFSCAR. **O que são macrófitas aquáticas**. Disponível em: <http://www.ufscar.br/~probio/info_macrof.html>. Acesso em 25 de jul. 2016.

VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Vergärung organischer stoffe – substratcharakterisierung, probenahme – stoffdatenaerhebung, gärversuche. German. 2006.

VON SPERLING, M. (1995) **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. Ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2005. v 1.

XU, J., SHEN, G. **Growing duckweed in swine wastewater for nutriente recovery and biomass production**. *Bioresource Technology* 102 (2011) 848-853. Disponível em: <<http://doi:10.1111/plb.12216>>. Acesso em 13 jun. 2016.

APÊNDICE

Neste apêndice, são apresentados os resultados obtidos e utilizados para a elaboração das figuras do capítulo de Resultados e Discussão.

Tabela A.1 – Resultados obtidos para a elaboração da Figura 23 (curva de produção de biogás da amostra de celulose cristalina).

Volume de Biogás (L)			
Dia	Eudiômetro 1 (volume acumulado em mL)	Eudiômetro 2 (volume acumulado em mL)	Eudiômetro 3 (volume acumulado em mL)
0	#N/D	#N/D	#N/D
0,83263889	-1,2	-1,3	-2,2
1,25972222	4,9	4,7	3,0
1,83611111	48,8	49,4	45,8
2,23055556	117,0	120,3	113,6
2,83541667	247,3	251,9	243,7
3,24513889	335,9	341,1	331,6
3,83472222	421,2	426,4	416,3
4,24375	462,8	465,6	456,6
4,88680556	519,1	513,7	506,6
6,84583333	577,0	566,5	567,4
7,83402778	585,7	577,8	577,9
8,83958333	592,6	587,7	586,4
9,8375	597,5	594,2	593,1
10,8590278	601,3	600,0	598,6
13,8416667	607,2	607,7	607,2
14,8625	608,5	609,0	609,6
15,8527778	610,1	610,6	611,3
16,8409722	612,1	612,1	613,4
17,8430556	613,5	613,9	614,8
20,8451389	616,3	616,1	617,7
21,8444444	616,9	616,7	618,4
22,8368056	617,3	616,5	618,8
24,8298611	618,3	617,0	619,9
27,84375	620,2	618,2	622,9
28,8402778	620,8	618,8	623,5
29,8361111	620,7	618,2	623,5
30,8347222	621,0	617,9	623,7
31,85625	621,5	617,8	624,2

Tabela A.2 – Resultados obtidos para a elaboração da Figura 24 (curva de produção de biogás a partir da produção de biogás para inóculo, inóculo e celulose microcristalina, inóculo e salvinia úmida, inóculo e macrófita desidratada e inóculo com efluente bovino).

PERÍODO	Biomassas – Volume de biogás (L)				
	Inóculo	Celulose Cristalina	Macrófita - Salvinia (úmida)	Macrófita - Salvinia (desidratada)	Efluente bovino
0,00	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
0,83	6,46±0,20	-1,56±0,53	19,74±0,42	16,94±0,86	76,50±1,75
1,26	8,60±0,46	4,19±1,07	25,45±0,51	21,66±0,94	92,61±0,70
1,84	10,05±0,40	48,03±1,94	38,64±1,34	27,41±1,01	108,18±1,29
2,23	11,96±0,59	116,99±3,34	49,11±2,45	31,66±1,43	119,54±1,92
2,84	13,41±0,69	247,63±4,15	60,11±3,59	38,19±1,93	134,64±3,01
3,25	15,09±0,84	336,21±4,74	65,36±4,17	42,97±2,33	144,41±3,70
3,83	16,55±0,93	421,31±5,09	70,70±4,82	49,24±2,92	157,65±4,27
4,24	18,29±0,99	461,67±4,59	73,71±4,95	53,68±3,44	166,56±4,59
4,89	23,28±1,38	513,14±6,23	77,81±5,25	59,58±3,83	179,60±5,23
6,85	25,42±1,63	570,31±5,80	84,50±5,54	71,83±4,57	213,07±7,43
7,83	27,78±1,77	580,47±4,56	86,20±6,22	75,68±4,88	226,39±8,54
8,84	29,90±2,03	588,89±3,24	87,07±5,93	78,69±4,88	237,93±9,31
9,84	31,91±2,16	594,93±2,33	88,02±5,84	81,25±5,54	248,13±10,10
10,86	36,63±2,90	599,95±1,39	88,83±5,31	83,66±5,92	257,11±10,86
13,84	38,49±3,20	607,37±0,32	90,59±4,86	87,97±7,10	279,39±12,12
14,86	39,95±3,45	609,04±0,58	91,01±4,79	89,30±7,87	285,55±13,05
15,85	41,30±3,74	610,67±0,61	91,58±4,38	90,42±8,15	290,05±13,21
16,84	42,53±3,94	612,54±0,76	93,25±4,31	92,29±8,65	295,15±13,52
17,84	46,18±4,77	614,10±0,67	94,62±3,95	94,04±9,16	299,75±13,99

PERÍODO	Biomassas – Volume de biogás (L)				
	Inóculo	Celulose Cristalina	Macrófita - Salvinia (úmida)	Macrófita - Salvinia (desidratada)	Efluente bovino
20,85	47,47±5,01	616,69±0,89	98,04±3,15	98,06±10,51	309,51±14,47
21,84	48,54±5,35	617,34±0,92	99,21±2,89	99,08±11,04	311,78±14,50
22,84	50,61±5,84	617,57±1,16	100,47±2,68	100,54±11,79	313,63±14,81
24,83	53,72±6,65	618,40±1,46	103,37±2,34	103,31±12,86	315,21±14,34
27,84	54,56±6,94	620,40±2,34	105,87±2,75	106,90±14,28	314,48±13,90
28,84	54,27±7,00	621,05±2,37	107,03±2,77	107,91±14,40	314,45±13,88
29,84	54,96±7,29	620,81±2,62	#N/D	#N/D	#N/D
30,83	56,03±7,49	620,90±2,90	107,76±3,03	108,11±14,82	316,63±14,41
31,86	56,03±7,49	621,17±3,20	107,84±3,12	108,39±15,38	317,10±14,41

Tabela A.3 – Resultados obtidos para elaboração da Figura 25 a partir da produção de biogás e metano das amostras analisadas.

Amostra	Parâmetro	Resultado (LN biogás.kg sv⁻¹)
Efluente bovino	Biogás	318±14,6
	Metano	213±11,2
Macrófita - Úmida	Biogás	108±3,1
	Metano	64±1,2
Macrófita – Desidratada	Biogás	109±15,3
	Metano	59±11,6

Tabela A.4 – Resultados obtidos para elaboração da Figura 26 do ensaio de celulose, hemicelulose lignina.

Parâmetro	Resultado (%)
Celulose	24,4±1,4
Hemicelulose	12,4±0,4
Lignina	14,1±0,1

Tabela A.5 – Resultados obtidos para elaboração da Figura 30 (curva de produção de biogás a partir da produção de biogás para inóculo, inóculo e celulose microcristalina, inóculo e efluente bovino, inóculo e macrófita desidratada, inóculo e mistura 1, inóculo e mistura 2, inóculo e mistura 3 e inóculo com mistura 4).

PERÍODO	Amostras							
	Inóculo	Celulose cristalina	Efluente bovino	Macrófita desidratada	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4
0,00	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
0,76	5,83±0,10	-0,29±0,16	-1,37±0,31	5,52±0,45	58,75±0,76	54,56±0,66	55,71±0,54	52,43±1,09
1,75	8,95±0,10	9,78±0,49	0,02±0,35	8,50±0,64	94,83±0,40	85,28±1,12	87,61±0,34	83,31±1,59
2,75	12,07±0,26	101,98±4,15	1,33±0,36	9,00±0,61	119,53±0,49	107,07±1,46	112,14±0,27	105,56±3,05
3,74	15,02±0,26	285,72±6,78	6,05±0,84	11,02±1,57	139,19±0,60	125,39±1,66	130,77±1,12	122,06±3,60
4,77	19,73±0,41	428,60±7,97	18,33±0,97	18,64±3,70	156,77±0,50	141,28±2,01	144,21±1,49	133,14±4,67
6,77	21,81±0,41	536,16±11,59	61,64±2,08	39,88±6,01	184,06±0,46	164,10±3,54	165,34±2,35	150,46±6,80
7,75	26,02±0,48	555,74±12,36	90,84±2,72	53,96±5,41	196,71±1,88	173,13±4,60	173,72±2,56	157,10±7,76
9,76	27,87±0,71	583,94±16,02	145,38±3,95	68,65±4,27	215,33±1,24	189,94±5,47	189,40±2,97	169,99±9,97
10,77	33,27±1,07	590,69±17,79	165,23±5,32	74,20±4,28	222,70±1,56	197,17±5,82	195,99±3,42	174,82±10,45
13,76	34,99±1,07	598,88±24,00	214,78±10,12	87,29±4,64	241,99±1,96	215,02±8,54	213,68±4,87	189,29±12,98
14,77	36,82±1,17	599,75±25,92	227,55±8,66	91,27±2,68	247,92±1,56	220,12±9,58	218,85±5,09	193,39±13,47
15,76	38,08±1,24	600,73±27,79	231,66±11,78	92,16±2,53	252,91±2,05	224,29±11,01	222,40±5,11	195,86±14,41
16,75	39,36±1,27	601,16±29,70	237,63±12,21	93,38±2,45	257,54±1,91	228,08±12,17	224,21±5,96	197,23±14,89
17,77	43,90±1,63	600,58±31,20	244,00±12,80	94,12±2,89	261,70±1,80	231,22±13,64	226,23±6,01	198,47±15,65
20,76	45,34±1,70	600,17±35,04	262,79±15,62	97,56±3,37	272,47±1,94	238,97±18,04	230,61±7,33	201,23±17,13
21,76	46,60±1,77	599,31±36,38	267,99±16,72	98,69±3,28	275,28±1,95	241,12±19,68	231,98±7,89	201,83±17,89
22,76	47,99±1,94	598,36±37,59	273,25±17,82	100,06±3,70	277,98±2,17	242,99±20,56	232,22±8,38	201,80±18,44
23,75	48,62±2,03	597,72±38,49	277,80±18,64	100,72±3,63	278,92±2,17	243,96±21,92	232,26±8,46	201,22±18,94
24,76	52,37±2,30	#N/D	282,55±20,06	102,30±3,85	280,76±2,40	244,76±23,11	232,49±9,15	201,33±18,64
27,76	53,58±2,30	593,12±42,37	293,66±23,54	107,72±4,09	284,65±2,62	249,43±25,57	233,14±10,21	200,81±20,24
28,77	55,21±2,38	592,02±43,27	295,70±24,00	110,47±4,04	285,82±2,49	249,60±25,26	233,41±10,49	201,15±20,67
30,78	55,21±2,38	590,29±44,03	297,50±24,86	111,25±4,24	285,68±3,27	247,93±25,86	231,12±10,71	198,76±21,38

Tabela A.6 – Resultados obtidos para elaboração da Figura 31 para relacionar a quantidade do PCI entre as amostras.

Amostra	PCI (Kcal m⁻³)
Efluente bovino	4372
Macrófita desidratada	3540
Mistura 1 – 6%	5212
Mistura 2 – 7%	5055
Mistura 3 – 8%	5237
Mistura 4 – 9%	5146

Tabela A.7 – Resultados obtidos para elaboração da Figura 32 para produção de biogás (L) por quilograma (Kg) de massa fresca.

Amostra	Biogás (L)	Metano (L)
Efluente bovino	11,44±0,96	6,68±0,72
Mistura 1 – 6%	12,20±0,12	8,40±0,22
Mistura 2 – 7%	12,16±1,23	8,66±1,05
Mistura 3 – 8%	12,79±0,52	8,85±0,64
Mistura 4 – 9%	12,31±1,13	8,67±0,99

Tabela A.8 - Resultados obtidos para elaboração da Figura 33 para produção diária de biogás.

Amostra	Produção diária de biogás (m³)
Efluente bovino	6,86±0,57
Mistura 1 – 6%	7,32±0,07
Mistura 2 – 7%	7,30±0,74
Mistura 3 – 8%	7,67±0,31
Mistura 4 – 9%	7,39±0,68