

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

MARCUS LÍVIO CARLIN

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA ANUAL
ASSOCIADA COM A VARIAÇÃO DA DIETA NO POTENCIAL BIOQUÍMICO DE
METANO ORIUNDO DE DEJETO BOVINO LEITEIRO EM LACTAÇÃO E FORA
DA LACTAÇÃO**

POÇOS DE CALDAS /MG

2025

MARCUS LÍVIO CARLIN

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA ANUAL
ASSOCIADA COM A VARIAÇÃO DA DIETA NO POTENCIAL BIOQUÍMICO DE
METANO ORIUNDO DE DEJETO BOVINO LEITEIRO EM LACTAÇÃO E FORA
DA LACTAÇÃO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes.
Orientadora: Profa. Dr. Renata Piacentini Rodriguez

POÇOS DE CALDAS /MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Carlin, Marcus Lívio .

Avaliação da influência da sazonalidade climática anual associada com a variação da dieta no potencial bioquímico de metano oriundo de dejetos bovinos leiteiros em lactação e fora da lactação / Marcus Lívio Carlin. - Poços de Caldas, MG, 2024.

87 f. : il. -

Orientador(a): Renata Piacentini Rodriguez.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.

Bibliografia.

1. Biogás . 2. Digestão anaeróbia. 3. Potencial energético. 4. Estrume bovino. 5. Pecuária. I. Rodriguez, Renata Piacentini, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

MARCUS LÍVIO CARLIN

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA ANUAL
ASSOCIADA COM A VARIAÇÃO DA DIETA NO POTENCIAL BIOQUÍMICO DE
METANO ORIUNDO DE DEJETO BOVINO LEITEIRO EM LACTAÇÃO E FORA
DA LACTAÇÃO**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas.

Área de Concentração: Tratamento de Efluentes

Aprovada em 16 de dezembro de 2024



Documento assinado digitalmente

RENATA PIACENTINI RODRIGUEZ

Data: 04/02/2025 08:16:30-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Renata Piacentini Rodriguez
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)

Profa. Dra. Rachel Biancalana Costa
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Rafael Brito de Moura
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)

AGRADECIMENTOS

À minha Família e Amigos, dos quais recebi apoio e incentivo, pois perceberam a importância desse trabalho para meu crescimento pessoal e profissional.

Em especial, aos Amigos e Professores Universitários, Rogério Borges Borsatto, docente da Faculdade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC) e Jaluza Maria Lima Silva Borsatto, docente da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), os quais considero “Padrinhos” deste projeto.

À Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) e aos Professores do Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia Ambiental (PPGCEA), pela oportunidade de aprendizado e pelo exemplo de dedicação e respeito ao conhecimento científico.

À minha Orientadora Profa. Dra. Renata Piacentini Rodriguez pela orientação, franqueza, paciência e confiança.

À minha colega e amiga Jessica Jacinta Silva pela amizade e colaboração e aos demais colegas que tornaram este ambiente acadêmico agradável, acolhedor e prolífico.

Aos funcionários da Unifal pela atenção, prontidão em me esclarecer acerca dos mais variados assuntos em todas as ocasiões nas quais precisei e por manterem o ambiente asseado e seguro.

À minha Esposa Maria Inês Fuziwara Carlin e à minha amada Filha, Lívia Fuziwara Carlin pelo apoio, incentivo e carinho.

Aos Sr. Roberto Lopes e Sra. Heloísa Helena Lopes, os quais estiveram o tempo todo ao meu lado, zelando pela minha empresa, permitindo que eu dedicasse maior tempo aos estudos.

Ao Sr. Antônio Sérgio Moraes, à sua esposa Sra. Elizabete Neri Moraes e aos filhos, produtores rurais e Amigos, há décadas, pela colaboração e confiança, ao permitir a realização parcial deste trabalho dentro de sua propriedade.

À minha falecida Mãe, a qual não pôde ver o final desta etapa da minha vida, mas que esteve e sempre estará ao meu lado.

À Deus, à Nossa Sra. Aparecida, dos quais recebi muitas bênçãos.

Agradeço, de Alma e Coração, a todos!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O mundo é como um espelho que devolve a cada pessoa o reflexo de seus próprios pensamentos. A maneira como você encara a vida é que faz toda diferença.”

(Luís Fernando Veríssimo)

RESUMO

O aproveitamento energético do estrume bovino, por meio da produção de biogás, é uma técnica consolidada para o manejo desse material, contribuindo para a geração de energia na forma de gás metano. No entanto, é essencial que os sistemas de produção de biogás e biometano apresentem poucas variações decorrentes das características do substrato. Devido às dimensões continentais do Brasil, as práticas de manejo do gado de corte e leiteiro variam ao longo do ano, especialmente devido às diversidades das condições climáticas. Neste contexto, este projeto teve como objetivo avaliar o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) do estrume bovino leiteiro em diferentes épocas do ano. Foram realizadas quatro coletas de estrume bovino, oriundas de gado leiteiro, nos meses de abril, agosto e dezembro de 2023 e abril de 2024, correspondendo às estações climáticas do outono, inverno, primavera e verão, respectivamente. O estrume foi caracterizado em termos de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), e os ensaios de PBM seguiram o protocolo VDI 4630 que estabelece uma relação 2:1 em termos de SV, para o inóculo e o substrato, respectivamente. O inóculo utilizado foi proveniente de um reator UASB e os ensaios de PBM foram operados em frascos de borossilicato de 250 ml. Os ensaios foram conduzidos em sistemas separados, utilizando estrume bovino oriundo de vacas lactantes (L) e de vacas não lactantes (NL), referentes às quatro coletas. Os ensaios realizados com substratos oriundos das coletas tiveram duração de 130, 147, 133 e 113 dias, no verão, outono, inverno e primavera, com o volume médio acumulado de biogás de 2150 ml, 1185 ml, 1350 ml e 2585 ml, para os ensaios com estrume de vacas L e 1650 ml, 1335 ml, 860 ml, 1812 ml, para estrume de vacas não NL respectivamente. A produção específica de metano foi de 407, 122, 218, 219 ml NCH₄/g SV, para as dietas L e 389, 145, 185, 208 ml NCH₄/g SV para as dietas NL no verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Esses resultados sugerem uma influência significativa da dieta e da sazonalidade climática nos ensaios de PBM, uma vez que o metabolismo das vacas sofre alterações durante os diferentes períodos do ano. Essas descobertas destacam a importância de considerar as variações sazonais e as práticas de manejo na produção de biogás a partir de estrume bovino, visando a otimização dos sistemas de produção de biogás e biometano no Brasil.

Palavras-chave: biogás; digestão anaeróbia; potencial energético; estrume bovino; pecuária.

ABSTRACT

The energy utilization of cattle manure, through biogas production, is an established technique for managing this material, contributing to energy generation in the form of methane gas. However, it is essential that biogas and biomethane production systems have few variations due to the characteristics of the substrate. Due to Brazil's continental dimensions, cattle management practices vary throughout the year, especially due to diverse climatic conditions. In this context, this project aimed to evaluate the Biochemical Methane Potential (BMP) of dairy cattle manure at different times of the year. Four collections of dairy cattle manure were made in April, August, and December 2023, and April 2024, corresponding to the seasons of autumn, winter, spring, and summer, respectively. The manure was characterized in terms of total solids (TS) and volatile solids (VS), and the BMP tests followed the VDI 4630 protocol, which establishes a 2:1 ratio in terms of VS for inoculum and substrate, respectively. The inoculum used came from a UASB reactor, and the BMP tests were operated in 250 ml borosilicate flasks. The tests were conducted in separate systems, using manure from lactating (L) and non-lactating (NL) cows, corresponding to the four collections. The tests conducted with substrates from the collections lasted 130, 147, 133, and 113 days in summer, autumn, winter, and spring, with an average accumulated biogas volume of 2150 ml, 1185 ml, 1350 ml, and 2585 ml for the tests with manure from L cows and 1650 ml, 1335 ml, 860 ml, and 1812 ml for manure from NL cows, respectively. The specific methane production was 407, 122, 218, and 219 ml NCH₄/g VS for L diets and 389, 145, 185, and 208 ml NCH₄/g VS for NL diets in summer, autumn, winter, and spring, respectively. These results suggest a significant influence of diet and climatic seasonality in the BMP tests, as cows' metabolism undergoes changes during different periods of the year. These findings highlight the importance of considering seasonal variations and management practices in biogas production from cattle manure, aiming at optimizing biogas and biomethane production systems in Brazil

Keywords: biogas; anaerobic digestion; energy potential; cattle manure; livestock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos metabólicos envolvidas no processo de digestão anaeróbia	26
Figura 2 - Fluxograma metodológico das etapas desenvolvidas	39
Figura 3 - Estrutura de confinamento do tipo Compost Barn	40
Figura 4 - Volumes acumulados de biogás (VAB) registrados nos ensaios de PBM para as dietas L e NL em função das estações climáticas.....	53
Figura 5 - Produção específica de metano (PEM) registrados nos ensaios de PBM para as dietas L e NL em função das estações climáticas.....	55
Figura 6 - Boxplot representando as PEM entre as dietas lactante (L) e não lactante (NL), coletadas no verão, inverno, primavera, outono.....	71
Figura 7 - Boxplot comparando a PEM, as estações climáticas e o controle negativo	72
Figura 8 - Representação da densidade dos dados das dietas lactante coletadas nas quatro estações climáticas.....	73
Figura 9 - Representação da densidade dos dados da dieta não lactante coletadas nas quatro estações climáticas.....	73
Figura 10 - Comportamento dos dados dos ensaios de PBM das dietas L e NL de acordo com as estações do ano em comparação ao modelo cinético de Gompertz	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de aquecimento global e períodos do IPCC (2001)	19
Tabela 2 - Parâmetros envolvidos no processo da digestão anaeróbia (DA)	27
Tabela 3 - Faixas de temperatura do crescimento microbiano	35
Tabela 4 - Cenários em que ocorreram as coletas	40
Tabela 5 - Detalhamento experimental dos ensaios de PBM	42
Tabela 6 - Detalhamento dos controles utilizados nos ensaios de PBM	43
Tabela 7 - Análise bromatológica das fezes (substratos)	44
Tabela 8 - Proteína bruta amostra origina (PBOrig.) em porcentagem (%), N (g/Kg), SV (%), nas fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações climáticas	45
Tabela 9 - Teores de FB (g/Kg) e FBOrig.(g/Kg) nas fezes originadas das dietas L eNL coletadas nas quatro estações	46
Tabela 10 - Fósforo amostra sêca (P) e Fósforo amostra original (POrig.), em g/kg, registrados das fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações	47
Tabela 11- Extrato etéreo (EE) e extrato etéreo amostra original (EEOrig.), em g/kg, registrados nas fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações.	48
Tabela 12 - Magnésio amostra original (MgOrig) registrados nas fezes originadas das dietas L e NL dietas L e NL coletadas nas quatro estações	49
Tabela 13 - Cálcio amostra seca (Ca) e cálcio amostra original (CaOrig.), em g/kg registrados das fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações	50
Tabela 14 - Matéria Mineral (MM) e Matéria Mineral da amostra original (MMOrig.), oriundas das dietas L e NL, ao longo das quatro estações	51
Tabela 15 - Sólidos em porcentagem (%) dos substratos e inóculo, para dietas L e NL	51
Tabela 16 - Volumes acumulados de biogás (VAB) registrados dos ensaios de PBM para as dietas L e NL em função das estações climáticas	52
Tabela 17 - Produção específica de metano (PEM - ml NCH ₄ /g SV) e teores de metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂) no biogás produzido das fezes originadas das dietas L e NL, coletadas nas estações climáticas do verão, outono, inverno e primavera	54
Tabela 18 - Resultados das análises bromatológicas para PB, PBOrig., N total, FB, FBOrig., P, POrig., EE, EEOrig., MgOrig., Ca, CaOrig., MM, MMOrg., CH ₄ , CO ₂ , SV, volume acumulado de biogás (VAB) e produção específica de metano (PEM)	56

Tabela 19 - Composição das dietas L e NL em kg por vaca/dia e respectivas porcentagens (%) de volumosos (V) e concentrados (C).....	58
Tabela 20 - Parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz e produção específica de metano.	75

LISTA DE SIGLAS

AGCC	Ácidos graxos de cadeia curta
AGVS	Ácidos graxos voláteis
BTL	Biomass to liquid
DA	Digestão anaeróbia
DQO	Demanda química de oxigênio
EACNT	Esterco de aves de corte não triturado
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protection Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
L	Lactante
MS	Matéria seca
NL	Não lactante
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
ONU	Organização das Nações Unidas
PAG	Potencial de aquecimento global
PBM	Potencial bioquímico de metano
PPM	Pesquisa da pecuária municipal
ST	Sólidos totais
SVT	Sólidos voláteis totais
T°C	Temperatura em graus centígrados
TGI	Trato gastro intestinal
TRH	Tempo de retenção hidráulica
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
UR	Umidade relativa

USDA

United States Department of Agriculture

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	ORIGEM DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E A PROBLEMÁTICA NO SETOR PECUÁRIO.....	19
3.2	PECUÁRIA NO BRASIL: CENÁRIO ATUAL E DESAFIOS	22
3.3	POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS BOVINOS POR DIGESTÃO ANAERÓBIA: VIABILIDADE	23
3.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA (DA).....	24
3.4.1	Requisitos gerais que otimizam os consórcios microbianos e a digestão anaeróbia	26
3.5	COMPOSIÇÃO DO DEJETO BOVINO (URINA E ESTRUME).....	28
3.6	PERÍODO DE LACTAÇÃO E SECO: CARACTERÍSTICAS DA DIETA ...	28
3.6.1	Período lactante	28
3.6.2	Período não lactante (ou período seco)	28
3.7	INFLUÊNCIA DA DIETA NA COMPOSIÇÃO DOS DEJETOS E NO DESEMPENHO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA (DA)	29
3.8	INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS BOVINOS	34
3.8.1	Temperatura (T°C) do ambiente e sua influência operacional na digestão anaeróbia	35
4	METODOLOGIA	39
4.1	LOCAL DE COLETA DAS AMOSTRAS	39
4.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO	40
4.2.1	Amostras “Não Lactante“ (Vacas no Período Seco)	41
4.2.2	Amostras “lactante“ (Vacas em Lactação)	41
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS DEJETOS E DO INÓCULO.....	41
4.4	PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS ENSAIOS DE PBM	42
4.5	TRATAMENTO DOS DADOS	43
4.5.1	Análise cinética: modelagem de Gompertz	43
4.5.2	Análise estatística	43

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	ANÁLISE BROMATOLÓGICA DOS SUBSTRATOS	44
5.1.1	Proteína bruta amostra seca (PB) e proteína bruta amostra original (PBOrig.), nitrogênio total (N) e sólidos voláteis (SV)	44
5.1.2	Fibra bruta da amostra seca (FB) e fibra bruta da amostra original (FBOrig.)	46
5.1.3	Fósforo amostra seca (P) e fósforo amostra original (POrig.)	47
5.1.4	Extrato etéreo (EE) e extrato etéreo amostra original (EEOrig.)	48
5.1.5	Magnésio amostra original (MgOrig).....	49
5.1.6	Cálcio amostra seca (Ca) e cálcio amostra original (CaOrig.).....	49
5.1.7	Matéria mineral amostra seca (MM) e matéria mineral amostra original (MMOrig.)	50
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS EM RELAÇÃO À SÉRIE DE SÓLIDOS TOTAIS (ST), SÓLIDOS VOLÁTEIS (SV) E SÓLIDOS FIXOS (SF).....	51
5.3	PRODUÇÃO DE BIOGÁS E PRODUÇÃO ESPECÍFICA DE METANO....	52
5.3.1	Volume acumulado de biogás (VAB).....	52
5.3.2	Produção específica de metano (PEM)	54
5.4	DISCUSSÃO DAS RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS BROMATOLÓGICOS, SÓLIDOS VOLÁTEIS (sv), METANO (CH ₄), DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂), COM OS VOLUMES ACUMULADOS DE BIOGÁS (vab) E PRODUÇÕES ESPECÍFICAS DE METANO (PEM) .	56
5.4.1	Relação dos parâmetros bromatológicos, SV, com o VAB	57
5.4.2	Relação dos parâmetros bromatológicos, SV, com as PEM	66
5.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS	70
5.5.1	Produções específicas de metano (PEM)	70
5.5.2	Boxplot comparando as PEM alcançadas em cada estação com o controle negativo.....	72
5.5.3	Densidade dos dados ao longo das coletas	73
5.5.4	Sólidos Voláteis (SV) / Sólidos Totais (ST) e relação com a produção específica de metano (P.E.M.).....	74
5.6	CINÉTICA: MODELO MODIFICADO DE GOMPERTZ.....	74
6	CONCLUSÕES	76
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

REFERÊNCIAS	78
--------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada na cidade de Glasgow em 2021, expôs a necessidade de se pensar estratégias rápidas e eficientes de mitigação das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Nesse sentido, dentre os gases denominados GEE, emitidos a partir de processos industriais, assim como das atividades do agronegócio, abrangendo setor produtivo e agroindustrial (laticínios, frigoríficos etc.), o gás metano (CH_4) voltou a ser visto como um ótimo aliado para exploração e aumento na eficiência de sistemas de compensação de créditos de carbono. Dentre as atividades do agronegócio, a pecuária se destaca no cenário nacional e internacional como responsável por emissões significativas destes GEE.

A intensificação dos sistemas de produção na bovinocultura leiteira já é uma realidade, se caracterizando como uma tendência de crescimento contínuo. O objetivo é explorar ao máximo a eficiência dos animais em menores áreas. Como uma das consequências desta intensificação podemos citar o acúmulo de dejetos em espaços cada vez mais reduzidos, tornando primordial a implementação de técnicas que possam mitigar o impacto ambiental resultante deste acúmulo. O aprimoramento dessas técnicas deve evitar sua prática de forma empírica, sem critérios teóricos bem fundamentados, visto que a utilização incorreta desses resíduos pode contribuir para contaminação dos recursos hídricos superficiais, na poluição do solo e das águas subterrâneas.

A digestão anaeróbia (DA) é uma técnica bastante estudada e em contínuo aprimoramento, sendo uma alternativa viável, pois contempla não somente a redução do poder poluidor do citado resíduo, mas possibilita também a geração de energia renovável de baixo custo a partir de um efluente com grande potencial de geração de bioenergia. Complementarmente, este processo pode produzir um subproduto rico em nutrientes com valor fertilizante, podendo ser aproveitado como fonte alternativa de adubação para suprimento, principalmente de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), respectivamente, além de reduzir a presença de patógenos no afluente.

O aperfeiçoamento crescente e contínuo da engenharia aplicada no desenvolvimento de novos biodigestores permite a depuração do efluente, assim como a geração de biogás, viabilizando a integração deste processo com usinas termelétricas, a utilização das estruturas de distribuição de gás natural já instaladas, além da geração de combustível para veículos ou Biomass to Liquid (BTL), abrindo assim, novas oportunidades para os novos tempos.

Entretanto, é relevante ressaltar que a sazonalidade climática inerente a um país continental como o Brasil, somada à diversidade de opções de alimentação que são ministradas aos animais, culminam em uma diversidade de combinações que determinam variações na composição dos substratos a serem submetidos à DA resultando em variados potenciais de produção de biogás.

O objetivo deste trabalho foi identificar a influência da variação climática estacional, assim como da variação da dieta sobre o potencial bioquímico do metano (PBM), ou seja, no perfil de produção de bioenergia por meio da DA, utilizando o estrume bovino oriundo de vacas lactantes e não lactantes.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral determinar o potencial bioquímico de metano (PBM) a partir da digestão anaeróbia de dejetos bovinos oriundos da pecuária de leite em função da variação do regime de alimentação, assim como das condições climáticas.

Hipótese Central: O potencial de produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos da pecuária de leite por meio da digestão anaeróbia (DA) é influenciado pelo regime de alimentação dos animais juntamente com o regime climático (temperaturas e precipitações).

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram objetivos específicos desta proposta:

- a. Caracterizar os dejetos bovinos da pecuária de leite ao longo de um ano, alinhado ao regime de alimentação e condições climáticas;
- b. Determinar o potencial bioquímico de metano (PBM) em sistemas de mono-digestão dos dejetos bovinos da pecuária de leite oriundo de vacas em período de lactação (L) e vacas fora do período de lactação (NL);
- c. Avaliar a produção máxima de metano, o conteúdo de metano e a velocidade máxima de produção de metano em função de cada estratégia de alimentação adotada;
- d. Determinar os parâmetros cinéticos de cada sistema analisado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ORIGEM DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E A PROBLEMÁTICA NO SETOR PECUÁRIO

Os principais gases de efeito estufa (GEE) são os dióxidos de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O).

De acordo com Singh *et al.* (2008) apud Kunz, Steinmetz e Amaral (2022), amônia (NH_3), não é considerada um GEE, mas é precursora da emissão de N_2O , pode afetar indiretamente a emissão deste gás, durante e após sua nitrificação quando retorna ao solo. O CO_2 representa 74,4% das emissões dos GEE, o CH_4 corresponde a 17,6%, o N_2O 6,2% e gases fluorados 2,1%, como HFCs, CFCs e SF_6 . (IPCC, 2014).

O CO_2 proveniente da agricultura pode se originar em maiores quantidades da queima de florestas ou outras formas de vegetações nativas, para a implantação de forragens. Estima-se que cerca de 33% das atuais fontes de emissão de GEE no Brasil, medidas em CO_2 equivalente, são provenientes de atividades da agropecuária (Brasil, 2020). O setor pecuário é responsável por emitir aproximadamente 14,5 % dos GEE de origem antrópica (FAO, 2020). O gás N_2O na agricultura se origina da atividade dos microrganismos sobre os dejetos excretados, que os utilizam como substratos para obtenção de nutrientes (processos de nitrificação e desnitrificação).

Embora o CO_2 seja o GEE mais abundante, os gases CH_4 e N_2O possuem maior poder de aquecimento global (PAG). O potencial de aquecimento global (PAG) do CH_4 em base de massa é 23 vezes maior que a do CO_2 , em um horizonte de tempo de 100 anos (IPCC, 2001), e do N_2O , 296 vezes maior em relação ao CO_2 (Tabela 1).

Tabela 1 - Potencial de aquecimento global e períodos do IPCC (2001)

Gás	Meia-vida atmosférica (anos)	20 anos	100 anos	500 anos
Metano	12	62	23	7
Óxido Nitroso	114	275	296	156
Hidrofluorcarboneto	260	9400	12000	10000
Hexafluoreto de Enxofre	3200	15100	22200	32400
Pentafluorcarbono	6500	-	9200	-

Fonte: IPCC (2001).

Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU, 2013), até 2050 será necessário dobrar a produção de carne e leite para atender à demanda mundial por alimentos.

Esta realidade, somada ao fato de o setor pecuário ser responsável por emitir aproximadamente 14,5% dos GEE de origem antrópica, impõe ao setor a necessidade de desenvolver e aplicar inovações nos sistemas de produção, com estratégias que contemplem a redução dos impactos ambientais, melhorem a produtividade dos ruminantes e reduzam as emissões de gases de efeito estufa, sem comprometimento do desempenho dos animais (FAO, 2020).

Segundo Murray, Bryant e Leng (1976), as emissões de metano produzidas pelos ruminantes via fermentação ruminal correspondem a aproximadamente 90 % das emissões advindas da pecuária. Deste montante, 89% é excretado via respiração e aproximadamente 1% pelo ânus. As emissões originadas do manejo de dejetos podem ser bastante variáveis. Kreuzer e Hindrichesen (2006), apresentam as emissões atribuídas aos ruminantes confinados podem corresponder de 7 a 27% das emissões totais de CH₄ relacionadas aos ruminantes. Em ambos os casos se originam da degradação fermentativa e enzimática dos carboidratos, lipídeos, proteínas, etc., pela comunidade microbiana (bactérias, arqueas, protozoários e fungos), que utilizam a energia contida nesses alimentos para seu crescimento.

A busca por produções de carne e leite em períodos mais curtos, ou seja, o aprimoramento da produtividade e da eficácia digestiva permitirá a redução das emissões não por animal, mas por unidade de produto (kg de leite ou de carne). Beauchemin *et al.* (2020), comentam que o incremento de produtividade das forragens e do desempenho animal têm reduzido a intensidade das emissões de CH₄ por unidade de carne e de leite (g CH₄/ produto ou variável animal). A criação bovina leiteira americana intensificada que se destaca pela contribuição da redução das emissões antrópicas dos GEE apresentando uma produção mais competitiva podendo adicionalmente, se alcançar a melhora da saúde animal, a estabilidade da produção e a redução das importações de produtos animais. De acordo com Santos e Nogueira (2012), a escolha adequada das pastagens, a suplementação dietética eficaz, a substituição das forragens por alimentos contendo menos fibra, controle sanitário, o aprimoramento genético, são práticas mitigadoras eficientes, lembrando que a avaliação meticulosa dos efeitos ambientais da pecuária deve contemplar as particularidades regionais, os aspectos tecnológicos, socioeconômicos e ambientais.

Outra possibilidade viável e sustentável já bastante conhecida e utilizada, é a digestão anaeróbia (DA) dos dejetos, a qual possibilita a depuração do poder poluente contido nesses resíduos, a geração de energia renovável (metano), a produção de biofertilizante, e, complementarmente, reduz a patogenicidade desses dejetos, promovendo saneamento ambiental.

De acordo com Yao *et al.* (2020), a gestão adequada do estrume pode ajudar a prevenir a drenagem descontrolada de nutrientes, compostos orgânicos e agentes patogênicos para o ambiente circundante, beneficiando tanto o produtor como o ambiente. Com a gestão responsável do estrume, almeja-se alcançar a conservação da função do ecossistema e a expansão da produção agrícola.

A utilização da DA no tratamento desses resíduos acaba sendo uma técnica alternativa importante para alcançar uma produção mais sustentável, visto que reduz seu potencial de impactar o meio ambiente devido a matéria orgânica presente na sua composição (Albarez *et al.*, 2015; Moraes; Zaiat; Bonomi, 2015). Ademais, é um processo de custo relativamente reduzido, pois a geração de energia do biogás originado da DA em estações de tratamento de dejetos pode ser contemplada com os créditos de carbono disponibilizados pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

A sustentabilidade de um processo pressupõe a integração de aspectos econômicos, sociais e ambientais. No contexto econômico, a viabilidade da utilização de esterco bovino (EB) foi avaliada por Galbiatti *et al.* (2010), em trabalho que comparou os desempenhos na produção de biogás de variados substratos utilizados em diversas proporções, tendo sempre como acompanhante EB, e, em uma das situações utilizando somente o EB. O autor apurou que a qualidade do biogás na fase de produção máxima foi semelhante para todos os substratos estudados, entretanto, o biogás que mostrou maior valor de metano na sua composição foi o produzido com EB, superior em até 17,7% em comparação à produção do esterco de aves de corte com cama de capim napier triturado (EACNT). Ainda no contexto da sustentabilidade econômica, Mendonça, Otenio e Paula (2021), avaliaram a DA em um biodigestor de lagoa coberta (condições anaeróbias) de dejetos oriundos do bovino leiteiro, após passagem por tamisador (peneira centrífuga-separação do material fibroso), coletando resultados promissores para os parâmetros mais relevantes deste processo. Adicionalmente, ao comparar a geração de energia elétrica por meio do biogás com a demanda da fazenda, esta não atenderia à demanda somente nos meses de abril e agosto. Entretanto, ao adaptar uma campânula acumuladora de biogás, as demandas foram supridas nos meses de menores produtividades tornando o sistema 100% sustentável. Os autores destacam ainda, que, com a economia de energia, esta adaptação seria paga em 3 anos.

3.2 PECUÁRIA NO BRASIL: CENÁRIO ATUAL E DESAFIOS

O rebanho bovino total brasileiro foi representado, ao final de 2023, pelo efetivo de 238,6 milhões de cabeças, de acordo com os dados publicados pela Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), (IBGE, 2024).

Em relação à pecuária voltada à produção de carne, são cerca de 197 milhões de animais, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Carne (ABIEC, 2024). Estima-se que ao final de 2025, este efetivo seja de 182,18 milhões de cabeças, segundo divulgação prévia do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2024). Apesar da retração numérica, de 2,5 %, o Brasil ainda possui o segundo maior rebanho comercial de bovinos em escala global, consolidando sua posição como um dos principais produtores e exportadores de carne bovina. Ressalta-se que a Índia, nº 1 do ranking em termos quantitativos, por questões culturais e religiosas, não direciona o gado para fins de produção de carne, e concentra-se na produção de leite e derivados como fonte de proteína para a população.

No contexto da pecuária bovina leiteira, a produção estimada de leite brasileira em 2023 foi de 35,4 bilhões de litros, alta de 2,4% em relação a 2022. Este incremento na produção foi alcançado com um efetivo de vacas menor, a citar, 15,7 milhões de vacas ordenhadas (0,1% a menos do que em 2022), sendo esse efetivo o menor já registrado desde 1979, indicando uma elevação na produtividade das vacas, segundo a Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), (IBGE, 2024).

Apesar desta elevação da produtividade ter sido alcançada e estar sendo continuamente aprimorada, ainda assim observa-se um abandono da atividade, especialmente por produtores menores. Uma das razões para esta realidade advêm da necessidade de produção em maiores escalas em plantas (projetos) maiores, com o objetivo de superar as margens estreitas de lucros inerentes à atividade. A concentração da produção ou adensamento espacial é uma realidade nas cadeias do agronegócio que almejam maior competitividade através da adoção de tecnificação. Ademais, essa tendência traz outras vantagens, como a agregação dos agentes envolvidos na cadeia produtiva favorecendo a competitividade, redução de custos de logística e de custos em geral. Oliveira, Carvalho e Borges (2024), comentam que, particularmente para o setor leiteiro, este evento se tornou interessante devido à perecibilidade dos produtos, à dispersão espacial da atividade e características da logística envolvida, a citar, captação, processamento e distribuição. Importante ressaltar, que esta tendência é observada a nível global nas últimas décadas.

Embora que esta tendência de produção em maiores escalas seja uma realidade, a pecuária leiteira ainda tem relevante importância econômica e social, pois gera emprego e renda e tem expressiva participação na agricultura familiar. Estima-se que, para cada 100 litros de leite produzidos, processados e comercializados são gerados de 4 a 17 empregos (FAO, 2022). A pecuária leiteira representa o terceiro maior valor da produção da pecuária nacional e o sexto de todo o agronegócio, o que correspondeu perto de 5% de todo o valor bruto da produção (VBP) da agropecuária do Brasil em 2021 (Brasil, 2022).

Outro fator relevante e recorrente que impacta negativamente o setor leiteiro são as importações deliberadas de leite em pó e derivados principalmente de países vizinhos. Em 2023 foram importados 2,25 bilhões de litros em equivalente leite, quantidade 68,8% maior que a observada em 2022 (CEPEA, 2024).

3.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS BOVINOS POR DIGESTÃO ANAERÓBIA: VIABILIDADE

A geração de energia descentralizada e próxima aos locais de consumo (autoconsumo), o sistema de créditos (net metering) ou a comercialização da energia na rede Lei nº 13.203/2015 (Brasil, 2015), são algumas das opções no Brasil que vem fomentando o potencial de geração do biogás. Moraes, Zaiat e Bonomi, (2015), comentam que a utilização do biogás gerado no tratamento anaeróbico dos resíduos pecuários pode servir como fonte renovável e alternativa, podendo ser utilizado na substituição dos combustíveis não renováveis utilizado na planta de operação, como o diesel, carvão, gasolina, entre outros, assim como para esquentar caldeiras e abastecer as frotas internas, gerando uma produção mais limpa, menos impactante ambientalmente e contribuindo no aumento econômico devido a diminuição nas perdas geradas na produção.

A produção de biogás diária, resultante da fermentação de 1 kg de estrume bovino é de 0,036 a 0,042 m³, suficiente para atender à demanda de biogás diária por habitante da zona rural, que é de 0,023 a 0,043 m³ (Ramachandran; Ray, 2004). De acordo com Coldebella (2006), o biogás com teores de CH₄ de 50% e 80%, possui capacidade de geração energética de 4,95 e 7,92 kWh m³, respectivamente. Considerando um valor médio de metano no biogás de 70% ao longo de um ano, pode-se supor um potencial energético em torno de 7 kW m³.

O potencial dos dejetos animais para produzir metano pode ser expresso em termos do CH₄ gerado por kg de sólidos voláteis (VS) de material residual. Esses valores variam de 0,17 a 0,49 m³ CH₄/ kg de VS (média de 0,25 m³ CH₄ por kg) (EPA, 1990).

Uma vaca produtora de leite, com idade média de 24 meses e produzindo 15 kg de leite, produz aproximadamente 45 kg de dejetos por dia. Já, uma vaca de corte produz aproximadamente 28 kg de dejetos por dia e em média, ambas produzem no mínimo 13 L de urina por dia (Fuentes, 1992 *apud* Paucar, 2017).

O Brasil somou, ao final de 2023, em confinamento, um efetivo de 7,03 milhões de animais para corte e 15,7 milhões de cabeças para produção de leite, confinados ou não (IBGE,2023). A soma desses dois valores, 23 milhões de cabeças, representa o número de cabeças que potencialmente podem produzir biogás e metano pela DA dos dejetos.

O valor energético da produção de estrume bovino sob o ponto de vista energético e como fertilizante, considerando o rebanho brasileiro confinado em 2009, foi de 62,9 bilhões de m³ biogás/ano, com valor energético estimado em $7,9 \times 10^8$ GJ/ano, e a possível geração de 117,08 TWh/ano de energia elétrica além da disponibilidade anual de 17, 97, e 106 (N, P, K, respectivamente) toneladas de macronutrientes (Santos; Nogueira, 2012). Os referidos autores estimaram uma economia de energia fóssil na ordem de $6,1 \cdot 10^8$ GJ/ano quando o fertilizante de origem química foi substituído pelo biofertilizante. Em relação às emissões de gases de efeito estufa evitadas, estimaram a mitigação de 564.122 Gg de CO₂ eq./ano, correspondendo a cerca de 73% das emissões totais brasileiras de CH₄ e N₂O no ano de 2005.

Paucar (2017) relata que a produção diária de biogás, a partir de dejetos de bovinos de corte confinados, foi de $0,056 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, com teor médio de 79,6% de metano, resultando em um potencial de produção diário de metano de $0,043 \text{ m}^3$ por quilograma de dejetos *in natura*. A autora cita também, Hardoim e Gonçalves (2000), os quais afirmaram que em um confinamento de 100 vacas, um biodigestor pode produzir um volume diário de 118 m^3 de biogás, volume este suficiente para atender com energia elétrica a demanda da ordenhadeira, do resfriador de leite, do triturador, do desintegrador, do misturador de ração e da bomba de água.

3.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA (DA)

A DA é um processo natural de transformação da matéria orgânica (MO) que ocorre na ausência de oxigênio. O processo se desenvolve através de um consórcio diversificado de comunidades de microrganismos que atuam simultaneamente em distintas etapas constituindo um delicado ecossistema com interações complexas. Ao decompor e estabilizar os compostos orgânicos mais complexos com elevada massa molecular em compostos mais simples, esses microrganismos produzem, ao final do processo, moléculas com maior biodegradabilidade e biogás, sendo este constituído principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e

um efluente biologicamente mais estabilizado (biofertilizante), rico em nutrientes (Chernicharo *et al.* 2007).

O gás metano causa o agravamento do efeito estufa quando emitido para a atmosfera, intensificando o aquecimento global e as mudanças climáticas, entretanto, é uma fonte alternativa e renovável para geração de energia elétrica e térmica, pois pode substituir o gás natural de origem fóssil.

Como resultado da DA, alcança-se também, a redução de sólidos voláteis (SV) e manutenção significativa das concentrações de nitrogênio/fósforo e potássio (NPK) que podem ser usados como biofertilizantes. Outra vantagem decorrente da DA é a redução do número de microrganismos patogênicos no resíduo que será disposto no meio ambiente.

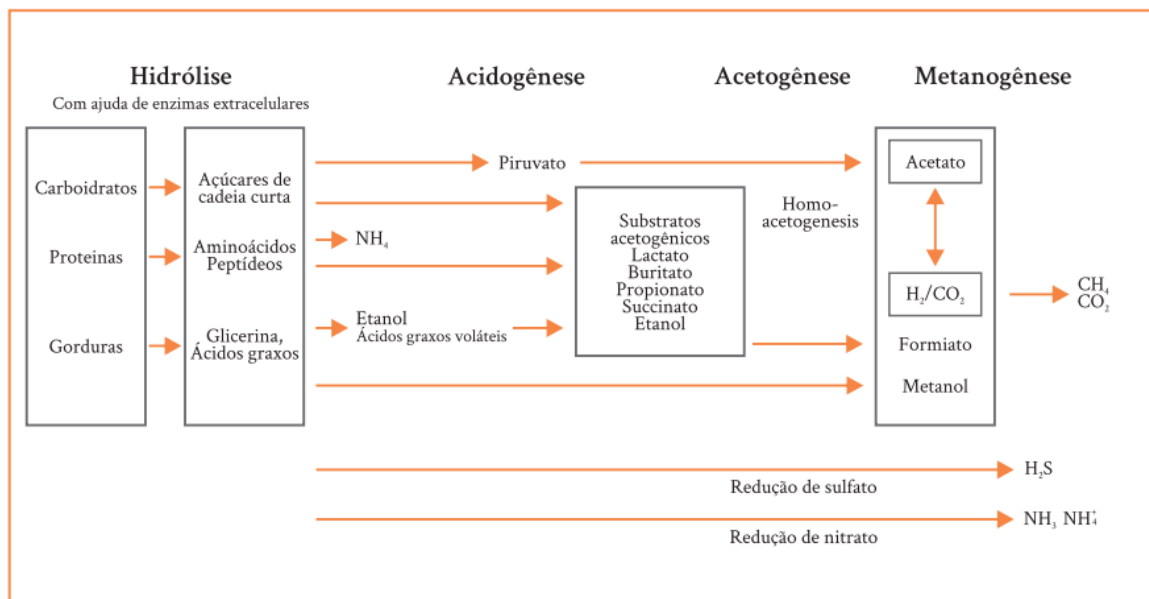
Segundo Madingan *et al.* (2016), a DA se desenvolve em 4 etapas: (i) **hidrólise**: nesta primeira etapa, enzimas hidrolíticas fermentativas excretam exoenzimas que hidrolisam compostos orgânicos complexos e de elevada massa molecular convertendo-os em monômeros básicos; (ii) **acidogênese**: nesta segunda etapa, bactérias anaeróbias e facultativas convertem os monômeros em ácidos orgânicos de cadeia curta (AGCC) também denominados ácidos graxos voláteis (AGVs), como, por exemplo, ácidos butílico, fórmico, propiônico, láctico, acético, álcoois (etanol), cetonas e compostos minerais como dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio (H_2S); (iii) **acetogênese**: considerada também uma fase líquida do processo, as bactérias sintróficas acetogênicas consideradas um grupo metabólico intermediário, convertem, por oxidação, os ácidos orgânicos da etapa anterior em acetato e hidrogênio e dióxido de carbono, sendo formados os substratos para a produção de metano; (iv) **metanogênese**: ocorre em condições estritamente anaeróbias e é considerada a etapa gasosa do processo, sendo os produtos metano e gás carbônico. As arqueias metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono.

Uma quinta etapa, a **sulfetogênese**, pode ocorrer em ambientes anaeróbios naturais como pântanos, fundos de oceano, sedimentos de fundo de lagoas, assim como em efluentes que contém compostos inorgânicos de enxofre como sulfato (SO_4^{-2}).

Nessas condições, esses compostos servem como receptor de elétrons e são utilizados por bactérias anaeróbias estritas, denominadas sulfetogênicas ou bactérias redutoras de sulfatos (BRS) reduzindo o sulfato a sulfeto de hidrogênio (H_2S). Essas bactérias podem também oxidar hidrogênio (H_2), e outros compostos orgânicos como ácidos graxos e álcoois, para produzir H_2S (Chernicharo *et al.* 2007).

As bactérias redutoras de sulfato (BRS) competem com as arqueas metanogênicas pelo consumo dos mesmos substratos (acetato e hidrogênio), contribuindo para redução da produção de metano (Figura 1) e, do ponto de vista de remoção de DQO, as BRS são mais eficientes que as arqueas metanogênicas. Durante a sulfetogênese há a liberação de gases de enxofre (S), como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), oriundo da redução de compostos de sulfato e sulfito (Chernicharo *et al.* 2007).

Figura 1 - Processos metabólicos envolvidas no processo de digestão anaeróbia



Fonte: Kunz, Steinmetz e Amaral (2022, p. 16).

3.4.1 Requisitos gerais que otimizam os consórcios microbianos e a digestão anaeróbia

A otimização da DA somente será alcançada mediante o atendimento dos requisitos ambientais e operacionais, os quais se interdependem, podendo resultar em um sinergismo ou antagonismo entre os consórcios microbianos ora desenvolvidos ou introduzidos, sendo então, esses requisitos, primordiais para que o processo alcance os objetivos técnicos e a viabilidade econômica que justifiquem sua aplicação.

De acordo com Gueri, Souza e Kuczman, (2017), condições ambientais e operacionais nos reatores anaeróbios moldam a eficiência global do processo de DA e os teores de metano contidos no biogás. Desta forma, a qualidade do biogás é resultado da interação de fatores, a citar, composição do substrato, a qual define a relação Carbono/Nitrogênio (C/N), tamanho da partícula, carga orgânica, pH, alcalinidade, umidade, balanceamento de macro e micronutrientes, temperatura, tempo de retenção hidráulica e frequência de agitação (tabela 2).

Em conjunto, esses requisitos condicionam o comportamento cinético e, conseqüentemente, a biodegradabilidade dos substratos envolvidos. As condições de T°C e pH influenciam a seleção, sobrevivência e crescimento dos microrganismos, existindo uma faixa estreita desses fatores para o crescimento ótimo desses, embora, muitos deles terem a capacidade de adaptação a faixas mais amplas.

Tabela 2 - Parâmetros envolvidos no processo da digestão anaeróbia (DA)

Parâmetros	Valor Ideal	Observações
Temperatura(°C)		
Mesofílico	30-40	35° C e 55° C são consideradas as temperaturas ideais para sistemas mesofílicos e termofílicos
Termofílico	40-70	
pH	6,3 - 7,9	Fora desses níveis, os microrganismos metanogênicos não se desenvolvem
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	1000 a 5000	^a Neutraliza as variações de acidez do resíduo
Acidez Volátil (mgCH ₃ COOH/L)	500-2000	Concentrações mais altas inibem o acetato e a produção de biogás
Acidez/alcalinidade (AV/AT)	0,1 a 0,5	Representa estabilidade para processos anaeróbios. Valores mais altos representam acúmulo de ácidos nos reatores
C/N	20 a 30	Relações mais elevadas levam ao consumo de N. Pelas metanogênicas, reduzindo a produção de metano
Carga Orgânica (kgSV.m ³ . r ⁻¹ . d ⁻¹)		
Mesofílico	0,4 a 6,4	Promove inibição microbiana em valores muito elevados
Termofílico	1,0 a 7,5	
TRH(dias)	9 a 95	Varia em função do substrato, temperatura, e o tipo de sistema de digestão.

Fonte: Gueri, Souza e Kuczman (2017, p. 20).

No contexto da composição do substrato, Demirci e Demirer (2004), utilizaram ensaios com estrume bovino e de frango em variadas proporções e sob duas concentrações iniciais diferentes de DQO (12.000 e 53.500 mg/L), observando, ao final, que o desempenho dos reatores diminuiu à medida que a fração de estrume de frango aumentou sob valores iniciais de DQO de 53.500 mg/L, e concluíram que essa redução de desempenho da DA foi devida à amônia (NH₃) produzida na degradação de proteínas dos substratos oriundos de aves inibindo o microrganismos anaeróbios metanogênicos.

Blasco *et al.* (2022), estudaram os efeitos da variação da composição de substratos oriundos de dejetos bovinos associados a biomassa sazonal, sobre o desempenho e evolução dos consórcios microbianos submetidos à co-digestão anaeróbia a longo prazo (428 dias). Ao final do experimento, encontraram moderada mudança no consórcio de bactérias e maior alteração nos gêneros de arqueias. Observaram conservação de uma microbiota central relativamente constante, flexível e estável, já que a taxa de carga orgânica e os volumes de co-substrato foram mantidos moderados em função de um manejo criterioso.

3.5 COMPOSIÇÃO DO DEJETO BOVINO (URINA E ESTRUME)

O dejetos bovino (DB) é uma mistura complexa de materiais orgânicos derivados das fezes e urina do gado com restos de alimentos não digeridos, segundo Morse *et al.* (1992). As fezes de vaca contêm componentes solúveis, particulados e fibrosos. Possui carboidratos (fibra celulósica e hemicelulósica), lipídios, gorduras e proteínas. Aproximadamente 40% a 50% dos sólidos voláteis (SV) no estrume leiteiro é biomassa lignocelulósica biodegradável que pode ser convertida em CH₄ (Saady; Massé, 2015). Ao comparar o DB com os dejetos de suínos e aves, Antunes (2019), relata que o DB apresenta menor potencial de produção de biogás, já que uma elevada proporção da matéria orgânica disponível no dejetos é digerida e convertida em metano no sistema digestivo dos ruminantes pela fermentação ruminal. Entretanto, de acordo com Orrico Junior, Amorim e Lucas Júnior (2011), embora os dejetos dos ruminantes apresentam altas concentrações de fibra e baixos potenciais de produção de biogás, o menor desempenho destes animais na conversão do alimento em produto e a maior produção de dejetos faz com que eles apresentem maiores produções de metano por kg de alimento produzido.

3.6 PERÍODO DE LACTAÇÃO E SECO: CARACTERÍSTICAS DA DIETA

3.6.1 Período lactante

O período de lactação das vacas leiteiras é o intervalo durante o qual uma vaca produz leite após o parto. Normalmente esse período é de aproximadamente 305 dias por ano, mas pode variar entre 210 e 240 dias. Quanto à alimentação, é ministrada uma dieta balanceada com maior valor de carboidratos de rápida degradação (ex. amido), proteínas, lipídeos, vitaminas, possuindo densidade energética superior, juntamente com a adequada proporção de volumoso (ex. silagem de milho), suplementada com concentrados e mistura mineral adequada.

O estrume oriundo deste período é caracterizado por maior teor de sólidos totais e voláteis, e normalmente apresenta maior potencial quantitativo de produção de biogás, assim como qualitativo (teor de metano).

3.6.2 Período não lactante (ou período seco)

O período não lactante, definido entre uma lactação e outra, coincide com os últimos 2 meses de gestação, nos quais serão formados 2/3 do organismo do bezerro, e para os quais os nutrientes serão prioritariamente direcionados. Di Pietro e Corso (2015) definem que esta é uma fase preparatória para um período de grandes demandas metabólicas. Este período deve durar 60 dias no qual se busca alcançar a regeneração das células epiteliais, um bom acúmulo de colostro e assegurar um bom desenvolvimento do feto e completar as reservas corporais, acaso necessário.

Tradicionalmente e culturalmente, no período sêco, a dieta se caracteriza em pastejo diretamente a pasto (forragem), com o mínimo de suplementação. Sendo assim, o estrume oriundo deste período é caracterizado por teor maior de material fibroso resultando em uma redução na biodegradabilidade desse substrato quando submetido ao processo de DA.

3.7 INFLUÊNCIA DA DIETA NA COMPOSIÇÃO DOS DEJETOS E NO DESEMPENHO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA (DA)

É consolidado o conhecimento científico que valida a correlação direta da dieta ministrada aos bovinos, com as características físico-químicas do dejetos gerado, delineando, desta forma, o comportamento cinético e o potencial quantitativo e qualitativo (ex. teor de metano) desses eventuais substratos, quando submetidos à digestão anaeróbia (DA).

A constituição morfo-fisiológica do sistema digestivo dos ruminantes tal qual conhecemos hoje, dotado de um estômago compartimentado, no qual o rúmen representa a maior proporção, teve sua origem no período eoceno intermediário (aproximadamente 30 a 40 Maa (milhões de anos atrás), constituindo um aparato evolutivo primordial para a adaptação desses animais aos recursos alimentares disponíveis deste período em diante. O desenvolvimento do rúmen permitiu o estabelecimento de condições ambientais peculiares ideais para abrigar consórcios microbianos, os quais puderam, da mesma forma, retribuir a gentileza aos hospedeiros, permitindo a esses, a extração e aproveitamento da energia e nutrientes contidos nas paredes celulares dos vegetais, constituída sobretudo de carboidratos complexos (ou polissacarídeos estruturais, celulose, hemicelulose), unidos por fortes ligações químicas (ligações glicosídicas tipo β). Complementarmente, viabiliza a utilização de fontes nitrogenadas não proteicas (Ex. uréia, ácido úrico) e incorporar o nitrogênio contido nessas fontes em proteína microbiana. (Detman, 2023).

Através dessa simbiose, a comunidade microbiana ruminal obtém dos alimentos ingeridos pelo hospedeiro (sobretudo da fração energética e proteica), os nutrientes necessários

para sua sobrevivência e desenvolvimento e, em contrapartida produz a massa microbiana, gases como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂), principalmente, e os ácido graxos de cadeia curta (AGCC), ou ácido graxos voláteis (AGV), os quais serão a principal fonte de energia para os ruminantes. Segundo Kozloski (2017), esta energia representa em torno de 75 a 80% da energia originalmente presente nos carboidratos fermentados e podem em 50 a 70% da energia digestível do alimento.

A fermentação em ruminantes é o resultado da atividade física e microbiológica, que converte os componentes dietéticos a ácidos graxos voláteis (AGV) ou ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), proteína microbiana e vitaminas do complexo B e vitamina K, metano e dióxido de carbono, amônia, nitrato e etc. (Owens; Goetsh, 1993 apud Solórzano, 2012).

Os principais AGCC formados são o acetato (C₂), propionato (C₃) e butirato (C₄), e são produzidos principalmente na fermentação de carboidratos de origem vegetal, a citar, a celulose, hemicelulose, pectina, amido e açúcares (Bergman, 1990). As diferenças de físicas e químicas na composição dos alimentos ministrados aos bovinos, conferem diferenças na digestibilidade entre as dietas, determinam o nível de consumo de matéria seca (CMS), assim como as taxas de passagem pelo trato gastro intestinal. Desta forma, selecionam comunidades microbianas especializadas conforme sua capacidade em digerir um substrato específico, as quais vão prevalecer no ambiente ruminal. Solórzano (2012), citando Relling e Mattioli (2003), apresenta as bactérias podem ser classificadas em fermentadoras de carboidratos estruturais, não-estruturais, proteolíticas, arqueias metanogênicas, lácticas e lipolíticas, em função das características da dieta ministrada, do substrato empregado e dos produtos finais da fermentação obtidos.

A composição da microbiota selecionada no rúmen, determina a sua eficiência degradativa (digestão e fermentação), pois, como todo processo de DA, esta eficiência depende de um delicado equilíbrio entre produção e consumo dos substratos gerados em cada etapa, o qual será mediado por esses consórcios microbianos.

Os AGCC são responsáveis em suprir, majoritariamente, os requerimentos energéticos dos ruminantes e a conversão eficaz da dieta em energia metabolizável. Estas relações são interdependentes e moldam o desempenho animal. De acordo com Mertens (1994), o CMS contribui com 60 a 90 % do desempenho animal. Van Soest (1994), esclarece que as reduções de digestibilidade das dietas são decorrentes da competição entre digestão e passagem e o aumento acentuado no consumo pode elevar a taxa de passagem e reduzir a digestibilidade dos nutrientes.

As dietas bovinas são divididas em dois grupos principais de alimentos, os concentrados e os volumosos.

Os alimentos concentrados são formados principalmente de grãos (milho, soja e trigo), subprodutos da indústria, como farelos, e outros alimentos com altos teores de proteína e lipídeos, o que confere aos mesmos, maior valor energético e maior densidade nutricional. Possuem maiores teores de carboidratos não estruturais (CNE), mais solúveis, como o amido, de rápida degradação, conferindo maior digestibilidade (menor tempo para a digestão) e passagem mais rápida pelo trato gastro intestinal (TGI), abrindo espaço físico para um novo fluxo (input) de alimentos, induzindo o animal ao maior consumo voluntário. Em apoio a esta afirmação, Detman, (2023), explica que a performance digestiva global dos ruminantes é um processo contínuo, resultante da competição entre taxa de degradação (fermentação e digestão) e taxa de passagem. De modo geral, o menor aproveitamento do alimento ingerido, pode resultar volume maior de alimentos excretados (fezes e urina), compostos por maiores teores de sólidos voláteis (SV). Acaso sejam submetidos ao processo de DA, esses substratos produzirão um biogás com maior potencial quantitativo e qualitativo (teor de metano).

A ingestão de alimentos concentrados seleciona bactérias amilolíticas (hidrolisam amido, açúcares simples e outros polissacarídeos), e produzem, preferencialmente o ácido graxo de cadeia curta (AGCC) propionato (C3). O maior estímulo ao consumo voluntário intensifica a produção de propionato (C3), cuja produção consome hidrogênio (H₂). As arqueas utilizam o H₂ para reduzir CO₂ a metano ou para a descaboxilação do acetato para também produzir metano (CH₄). Assim, podemos inferir que a intensificação da formação de propionato desfavorece a produção de metano. Decorrente desse fato, quando ocorre consumo elevado de dietas com concentrados, pode haver acúmulos de AGCC produzidos nas etapas anteriores e redução de pH ruminal. Arqueias metanogênicas são sensíveis à variações bruscas de pH. Bactérias acidogênicas que atuam nas etapas iniciais são mais tolerantes a essas variações de pH. Este desequilíbrio entre produção de AGCC (ou AGV) e utilização reduz a eficiência degradativa ruminal. Kunz, Steinmetz e Amaral (2022), esclarecem que a maioria dos problemas na DA pode ser atribuída a o acúmulo de AGV resultando na redução de pH, sendo este um motivo recorrente para a ineficiência deste processo, e acrescenta que os efeitos adversos estão relacionados ao fato de serem espécies intermediárias. O referido autor comenta, ainda, que o pH abaixo de 6,6 implica na inibição do crescimento de arqueas metanogênicas, sendo que as bactérias acidogênicas continuam suas funções até pH 4,5 resultando é um rápido acúmulo de AGV.

O outro grupo de alimentos é denominado de volumosos, no qual predomina a maior proporção de alimentos fibrosos, pois são compostos principalmente da parede vegetal integral (forragens, fenos), moída (cana de açúcar), ou moída e fermentada (silagem de milho). Este grupo apresenta maiores teores de carboidratos estruturais (CE), polissacarídeos complexos que compõem a parede celular dos vegetais (celulose, hemicelulose, lignina), os quais conferem a essa dieta menor digestibilidade, resultando em passagem mais lenta da digesta pelo trato gastro intestinal (TGI), principalmente pelo efeito de enchimento decorrente da limitação do espaço físico ruminal. Nessas condições, as taxas de degradação (digestão e fermentação) também ficam limitadas, resultando em redução do consumo voluntário (CV) e ingestão de matéria seca (IMS), assim como decréscimo das taxas metabólicas da microbiota ruminal. Os alimentos volumosos, selecionam preferencialmente as bactérias fibrolíticas (hidrolisam compostos fibrosos), a citar, como exemplo, as celulolíticas (hidrolisam a celulose). Produzem, preferencialmente o AGCC acetato (C2). Na formação do acetato, ao contrário do processo de formação de propionato, H₂ são produzidos e serão utilizados pelas arqueias para a redução do dióxido de carbono (CO₂) a metano. Entretanto alguns grupos de arqueias podem converter o acetato diretamente a metano, por descarboxilação do acetato. Assim, podemos inferir que a ingestão dos volumosos favorece a emissão de metano ruminal.

Em apoio ao que foi descrito, Carvalho (2003), apresenta que as dietas com maiores teores de concentrados apresentam proporção de AGCC ao redor de 50:40:10 moles de acetato, propionato e butirato, respectivamente, e nas dietas à base de forragens, as proporções entre os AGCC no rúmen se mantêm em torno de 65:25:10 moles.

A emissão de metano ruminal é necessária, pois equilibra os níveis de H₂ e conseqüentemente a produção excessiva de AGCC originados da degradação dos carboidratos. Neste sentido, Pedreira *et al.* (2004), esclarece que no decorrer da fermentação dos carboidratos no rúmen, os teores de H₂ se elevam, e, acaso não forem removidos, podem inibir os sistemas enzimáticos que envolvem NADH, importante cofator na fermentação dos carboidratos.

De toda forma, esta emissão de metano via narinas (eructação), implica em perda energética para o animal ruminante, seja pela menor produção de propionato, um importante recurso energético, pois é precursor na síntese de glicose realizada por compostos que não são carboidratos (gliconeogênese), seja como pela menor produção de AGCC, os quais são o principal recurso energético dos ruminantes, podendo reduzir a eficiência degradativa ruminal, já que a comunidade microbiana utilizaria esta energia. De acordo com Johnson e Johnson (1995), cerca de 6% a 12% da energia ingerida é eructada na forma de CH₄.

Contextualizando essas informações, Orrico Junior, Amorim e Lucas Júnior (2010), avaliaram as possíveis alterações existentes na composição e no processo de biodigestão anaeróbia dos dejetos de bovinos em fase de terminação, alimentados com diferentes proporções de volumoso (V) e concentrado (C). Os autores obtiveram como resultados que o aumento da proporção de volumoso na dieta levou à menor eficiência no processo, principalmente nos potenciais de produção de biogás e metano, que foram em média 13% menores. Goulart (2011), em pesquisa sobre comportamento ingestivo e digestibilidade de nutrientes em vacas submetidas a diferentes níveis de concentrado, apresenta que vacas que receberam 60% de concentrado na dieta apresentaram menor tempo para as atividades de apreensão e ingestão, e as atividades de ruminação diminuíram linearmente ($P \leq 0,05$) em função do teor de concentrados, aumentando, assim, o tempo de ócio. O mesmo autor, cita Queiroz *et al.* (2001), os quais observaram que o teor de FDN influencia o comportamento alimentar com maior utilização do tempo para a ingestão e para a ruminação para dietas com alto teor de fibra.

Estudos de Amon *et al.* (2007), mostraram que a digestibilidade anaeróbia de esterco de animais é marcadamente influenciada pela dieta e desempenho animal. A produção de metano no rúmen é menor em animais cujas dietas são balanceadas e constituídas de alimentos menos fibrosos (concentrados) ou com fibras mais digestíveis, situação encontrada em sistemas de confinamentos eficientes. Decorrente desta redução de produção de metano ruminal os dejetos apresentarão maior digestibilidade e maiores teores de nutrientes. Acaso sejam submetidos à DA, apresentarão maior potencial de produção de biogás.

A influência do material fibroso do dejetos na DA é relatada por Mendonça, Otenio e Paula (2021), que avaliaram os efeitos da separação de material fibroso do efluente no TRH com uso de tamisadores na DA de dejetos bovinos, e observou que o elevado valor da relação DQO/DBO_{5:20} (4%) é consequência da elevada concentração de material fibroso (celulose, hemicelulose, lignina etc.). Em acordo com essa afirmação Saady e Massé (2015), apresentam que a lignina restringe a decomposição dos compostos orgânicos pelas enzimas microbianas em um curto espaço de tempo por formar complexos com a celulose e a hemicelulose, portanto, quanto maior a quantidade de lignina mais difícil é a degradação de substratos fibrosos.

Perante o exposto, fica evidente a influência da dieta na seleção das comunidades microbianas e nos respectivos AGCC produzidos, determinando o perfil da fermentação ruminal, a composição do dejetos, moldando, assim, o potencial de produção de biogás e metano, quando esses substratos são submetidos à DA.

3.8 INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS BOVINOS

As estações do ano, possuem temperaturas (T°C) médias, níveis de radiação solar, índices pluviométricos e gradientes térmicos (amplitude térmica diária-diurna e noturna) peculiares, ou seja, sazonais.

Na diversidade de ambientes e de períodos nos quais os processos de DA se desenvolvem, essa sazonalidade climática terá consequências diretas ou indiretas sobre os animais, alterando a composição dos dejetos, potenciais substratos deste processo. O mesmo poderá ser impactado diretamente quando é artificialmente estabelecido e controlado pelo homem (reatores, lagoas, etc.), assunto que abordaremos adiante no sub-tópico 3.8.1.

No contexto dos animais, as T°C têm influência indireta ao afetar a disponibilidade e a qualidade dos alimentos ofertados aos bovinos. Considerando que os dejetos são formados pela fração dietética não aproveitada pelo trato gastrintestinal (TGI) dos animais, eles apresentarão uma composição físico/química variável, e, quando submetidos ao processo de DA, essa composição determinará o comportamento cinético das reações e a biodegradabilidade desses substratos, moldando, assim, a eficiência deste processo. Em concordância com este posicionamento, Salla (2005) lembra que a produção leiteira no sistema de pastejo é influenciada pelas condições quantitativas e qualitativas das forragens, assim como pela eficiência em consumi-las e utilizá-las.

Como influência direta, ainda no contexto dos animais ruminantes, a estacionalidade pode afetar a homeotermia (ou homeostase) desses ruminantes, processo pelo qual conservam sua temperatura interna dentro de um intervalo no qual não são submetidos ao estresse térmico. Este intervalo é definido como zona de conforto térmico (ZCT) ou zona de termoneutralidade (ZTN). Bligh e Johnson (1973), citado por Da Silva (2015), definem a ZTN sendo aquela na qual o animal pode apresentar a sua taxa metabólica mínima dentro da qual ocorre a regulação da homeotermia é alcançada, através, principalmente, da troca de calor sensível. Fora deste intervalo, as T°C podem alterar o seu metabolismo e induzi-los a alterações comportamentais, dentre estes, o comportamento ingestivo, a citar, o consumo voluntário. Daltro (2014), pontua que os animais homeotérmicos reagem a alterações do ambiente térmico, não só funcional e estruturalmente, como também através de respostas comportamentais. A mesma autora, citando Azevêdo e Alves (2009), esclarece que sob condições de estresse causado por baixas T°C, esses animais produzem calor (termogênese) recorrendo ao incremento do consumo de alimentos afim de elevar o calor interno (calor endógeno), e sob condições de estresse pelo calor, o animal

reduz a ingestão de alimentos afim de reduzir a produção interna de calor (reduzir a taxa metabólica), dissipando-o para o ambiente, por intermédio da condução, convecção, radiação ou evaporação (termólise). Moss, Jouany e Newbold (2000), destacam a importância da T°C ambiental expondo que este é um dos fatores que afetam a produção de gases, seja de forma indireta, determinando a constituição química das plantas, seja de forma direta, alterando o comportamento ingestivo do animal e o perfil da digestão. Ferreira *et al.* (2013), apresenta que o consumo voluntário é bastante afetado por variações repentinas de T°, na medida que pode desestabilizar a homeotermia dos ruminantes, que é a capacidade de manter a sua temperatura corporal em níveis equilibrados, buscando conservar a “T°C ótima” para consumo, digestão, absorção e metabolismo. Souza (2021), esclarece que, os ruminantes, assim como outras espécies homeotérmicas, ajustam seu comportamento de acordo com suas necessidades nutricionais, sobretudo energia. Ajustam-se às variadas condições de manejo, ambiente e alimentação e modificam parâmetros de comportamento ingestivo para alcançar e manter um nível de consumo que possa suprir seus requerimentos nutricionais.

Perante o exposto, podemos inferir que as variações de T°C influenciarão a composição e características dos dejetos e seu potencial de produção de biogás.

3.8.1 Temperatura (T°C) do ambiente e sua influência operacional na digestão anaeróbia

A oscilação da temperatura (T°C) do ambiente tem relevante influência direta sobre os processos de DA artificialmente desenvolvidos e controlados.

Segundo Lettinga (1996), na maioria dos processos biológicos, três faixas de T°C podem ser associadas ao crescimento microbiano (Tabela 3).

Tabela 3 - Faixas de temperatura do crescimento microbiano

Faixa	Intervalo
Psicrofílica	Entre 0 e 20
Mesofílica	Entre 20 e 45
Termofílica	Entre 45 e 70 e acima

Fonte: Adaptado de Lettinga (1996).

Em trabalho de revisão de literatura Yao *et al.* (2020) apresentam resultados de diversas pesquisas relacionadas à influência da temperatura na DA na gestão de estrume em regiões frias.

Os autores apresentam que a DA termofílica exibe taxas de reação mais rápidas comparadas à DA mesofílica, visto que as altas T°C favorecem as reações endergônicas, como

a quebra do propionato em acetato, mas desfavorecem as reações exergônicas, como reações hidrogenotróficas (utilização H_2 como fonte de energia), ocasião na qual as arqueas utilizariam o H_2 para reduzir o CO_2 para produzir o metano ($4 H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$), resultando em redução da atividade metanogênica. Os autores explicam que, complementarmente, a acidificação pode ocorrer durante a DA termofílica afetando negativamente o comportamento das arqueas metanogênicas que são extremamente sensíveis às flutuações de pH e têm seu crescimento reduzido quando o pH se encontra abaixo de 6,6. Quanto aos microrganismos acidogênicos, esses têm maior tolerância a $T^\circ C$ e pH mais baixos em comparação aos metanogênicos, tolerando pH na faixa de 4,0–8,5 durante o processo de hidrólise. Nesse contexto, a taxa de conversão dos ácidos será retardada podendo ocorrer o seu acúmulo e o comprometimento do processo global da DA. Em relação à DA psicofílica (baixas $T^\circ C$), os autores relatam que esta comumente apresenta menor produção de metano, maior instabilidade, menor taxa metabólica dos microrganismos, necessitando de maior tempo de inicialização.

A respeito do parâmetro tempo de retenção hidráulica (TRH), o qual corresponde ao tempo necessário para a degradação integral do substrato, os autores expõem que, nas condições psicofílicas a atividade dos microrganismos será retardada e o TRH poderá ser mais longo comparado ao TRH da digestão mesofílica. Além disso, em $T^\circ C$ psicofílicas, há uma grande variação no acúmulo de AGV em diferentes TRH. A concentração de propionato foi cerca de três vezes maior do que a de acetato em TRH de 20 dias, enquanto em TRH mais elevada, as concentrações destes dois AGV foram mantidas em níveis quase iguais. A considerar que o propionato é tóxico para as arqueas metanogênicas e reduz a produção de metano, somado ao fato de o processo de produção de acetato ser inibido em baixo TRH limitando, também, o crescimento de metanogênicos, podemos concluir que um TRH mais longo é benéfico para a digestão sob baixas $T^\circ C$.

Os autores apresentam, também, que a $T^\circ C$ e a taxa de carga orgânica (TCO), a qual representa a quantidade de sólidos voláteis do substrato por dia, apresentam alta correlação, e sob condições de baixa $T^\circ C$, o ajuste de um OLR adequado pode beneficiar a produção de biogás. No entanto, um aumento abrupto na TCO pode ocasionar inconsistências no sistema, atribuídas à redução da eficiência de remoção de DQO (demanda química de oxigênio), taxa de produção de metano e pH. Em $T^\circ C$ simuladas de inverno, os tratamentos de alta e baixa taxa de carregamento tiveram desempenhos muito diferentes. As taxas de carregamento mais altas diminuíram o desempenho, que foi recuperado com a aplicação de taxas de carregamento mais baixas. Demirci e Demirer (2004), avaliaram a DA e o potencial de geração de biogás utilizando diferentes proporções de esterco de frango e bovino possuindo demandas químicas iniciais de

oxigênio (DQO) distintas (12.000 e 53.500 mg/L) e investigaram os efeitos da T°C na eficiência da DA e na aclimação microbiana. Os dados obtidos nos ensaios permitiram o autor relatar que à T°C ambiente (mais frias), a eficiência da DA diminuiu como resultado da sensibilidade dos sistemas anaeróbios a baixas T°C. Como conclusão, os autores apresentam que a pré-aclimação é fortemente recomendada para aumentar a eficiência do processo de digestão. A DA e Co-digestão de dejetos bovinos e de frangos de corte em temperatura ambiente não foi tão eficiente quanto a 35 °C (mesofílica), mesmo com o uso de cultura previamente aclimatada aos dejetos e não é sugerida por exigir THR muito longos.

Nandi *et al.* (2020), avaliaram a influência da T°C na DA de esterco de vaca operando reatores ajustados para T°C variando de 10°C a 45°C sobre parâmetros como ST, SV, pH, AGVs, N-NH₃, NT. As taxas de produção de biogás e concentração de metano foram examinadas e os dados apurados indicaram que o reator ajustado a 40°C produziu rendimentos máximos de biogás (312,43 L/kg SV) e metano (209,70 L/kg SV), seguida pelos reatores a 35°C e 30°C. A análise estatística dos resultados deste experimento, indicaram que o desempenho ideal do processo em termos de rendimento de metano e degradação de SV é alcançado a uma T°C do reator de 35,82°C. Os autores apresentam que um digestor aquecido a uma temperatura mais elevada favorece a taxa de produção de biogás podendo reduzir o TRH e o porte do biodigestor.

Entretanto as condições operacionais termofílicas podem apresentar restrições de diversas ordens, a citar, por exemplo, econômicas, devido à maior vulnerabilidade à instabilidades técnicas, como a sensibilidade à inibição (ex. pela amônia), maior vulnerabilidade (menor tolerância) às flutuações de T°C pelos microrganismos atuantes na fase inicial do processo, e ressaltando que, quanto a esse aspecto, as arqueas mesófilas são mais resilientes a variações, tolerando oscilações de T°C ± 3 , sem comprometimento na produção de biogás.

Tietz *et al.* (2014), buscaram avaliar a influência da T°C externa (ambiental), na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite. Foram obtidos os dados de T°C interna e externa do biodigestor, volume de biogás produzido e teor de CH₄, CO₂ e outros gases presentes no biogás. Os resultados indicaram que, embora as T°C não estivessem em todos os horários dentro da faixa ideal para a produção de biogás, as T°C médias nas regiões superior, intermediária e inferior do biodigestor se mantiveram dentro da faixa mesofílica, entre 20 e 45 °C (condições para uma boa performance da DA). As T°C médias das regiões intermediária e inferior, internas ao biodigestor, seguiram o comportamento da T°C externa ao biodigestor e a T°C média da região superior interna foi influenciada pelos fatores externos e

pela troca de energia entre as massas. Os resultados mostram que não houve divergência entre os teores semanais de CH₄ e CO₂, acompanhando a produção média de biogás. A variabilidade da T°C influenciou a produção do biogás. Variações bruscas de T°C podem ter afetado a atividade das bactérias mesofílicas, resultando na redução da produção de biogás. Os autores validam suas conclusões citando Sosa, Chao, e Ríó (1999), em trabalho no qual o autor destaca a sensibilidade das bactérias mesofílicas às mudanças de T°C no meio, e as variações bruscas destas, afetando o seu desempenho.

Amon *et al.* (2007) mediram a produção de CH₄ em uma planta comercial de biogás durante 1 ano. A usina de biogás digeriu esterco de gado leiteiro e de suínos. A produção específica de metano não foi constante ao longo do ano. Quando a dieta do gado leiteiro mudou, de ração de inverno para ração de verão, a produção específica de metano aumentou. A alimentação de inverno consistia principalmente de feno. Na primavera e no verão, era alimentado com grama fresca de trevo.

Moraes (2000), em trabalho no qual avaliou a biodegradabilidade anaeróbia de águas residuárias de bovinocultura e suinocultura, testando combinações entre 3(três) procedências de lodos granulados (UASB bovinos, UASB aves, UASB suínos) com variações dos respectivos efluentes, destacou que as variações ambientais como a T°C do meio, em conjunto com outros fatores, influenciam a cinética e, conseqüentemente, a biodegradabilidade dos substratos, uma vez que os parâmetros cinéticos são dependentes não só das características do lodo e da composição do substrato, como também das condições ambientais

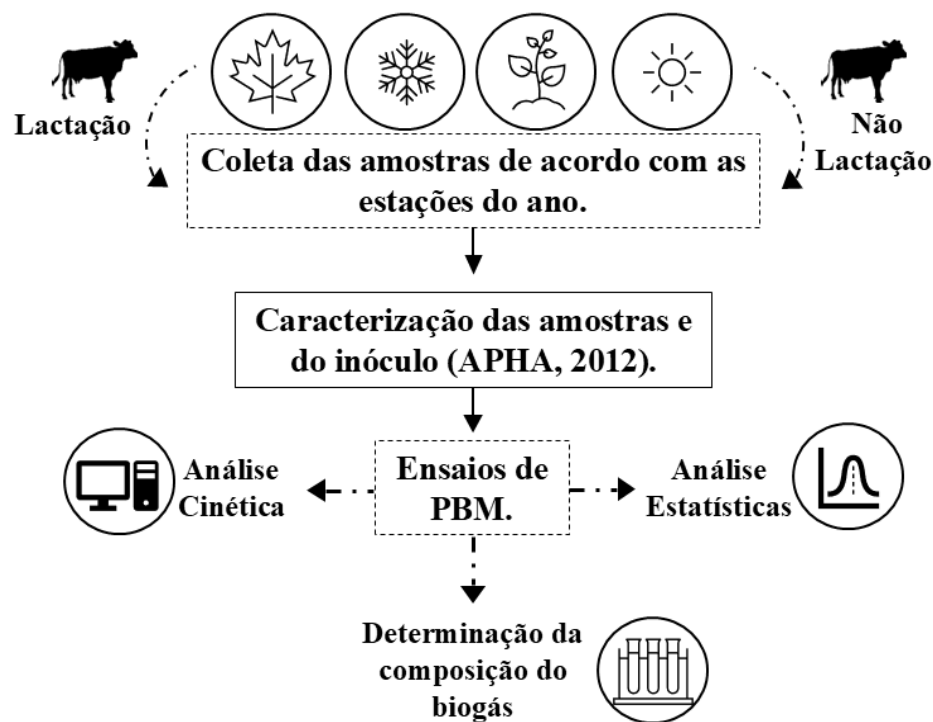
Sob a luz das informações expostas, podemos inferir que a sazonalidade climática, a depender da intensidade, pode induzir os ruminantes a alterações comportamentais no sentido de se equilibrarem termodinamicamente com o ambiente externo, sendo a mudança de comportamento ingestivo, o fator mais relevante, por alterar a digestibilidade, os níveis de consumo. Assim a composição físico/química final dos dejetos excretados será estabelecida, bem como o potencial de produção de biogás e metano desses substratos quando esses forem submetidos à DA.

Complementarmente, as variações das T°C ambiente também podem influenciar as T°C ótimas específicas de cada microbiota presente nas câmaras de fermentação (lagoas, reatores, etc.), moldando a eficiência desses processos.

4 METODOLOGIA

Esse trabalho foi dividido em 4 etapas, definidas pelas quatro estações do ano, nas quais foram realizadas coletas de esterco bovino de vacas lactantes e não lactantes. A Figura 2 apresenta o fluxo escolhido para a condução deste projeto, cujo elemento central foi a realização de ensaios de potencial bioquímico de metano (PBM).

Figura 2 - Fluxograma metodológico das etapas desenvolvidas



Fonte: Autor (2024).

4.1 LOCAL DE COLETA DAS AMOSTRAS

As coletas a campo foram realizadas no Sítio Córrego do Barreiro, localizado na divisa entre Poços de Caldas e Botelhos, em local denominado “Ponte João Neri”, cujas coordenadas são Latitude -21°.30.60.29 SUL (S); Longitude -45°.30.40.21 OESTE (W), com 850 metros de altitude.

O clima do município é caracterizado, segundo o IBGE, como um clima tropical de altitude, possuindo as estações de inverno seco e verão chuvoso bem definidas, chovendo muito mais no verão que no inverno. Na classificação climática de Köppen-Geiger o clima dessa região é classificado como Cwa, clima subtropical úmido com invernos secos (a média do mês

mais seco é menor que um décimo da precipitação média do mês de verão mais úmido, ou menos de 40 mm.

As datas das coletas foram definidas com o propósito de coincidirem, cada uma, dentro de uma estação climática (Tabela 4).

Tabela 4 - Cenários em que ocorreram as coletas

Coleta	Dia	Mês	Ano	Estação do Ano
Primeira	19	Março	2023	Verão
Segunda	20	Agosto	2023	Inverno
Terceira	29	Novembro	2023	Primavera
Quarta	07	Maio	2024	Outono

Fonte: Autor (2024).

4.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

A propriedade escolhida utiliza o sistema de confinamento denominado “Compost Barn”, no qual as vacas ficam confinadas, recebendo alimentação no cocho, são ordenhadas, descansam e passam a noite até a próxima ordenha, ou seja, todas as operações são realizadas nesta estrutura (Figura 3).

Figura 3 - Estrutura de confinamento do tipo Compost Barn



Fonte: O autor (2024).

4.2.1 Amostras “Não Lactante“ (Vacas no Período Seco)

Os dejetos foram coletados nos pastos formados por braquiarião (*Brachiaria brizantha*). Foram coletados dejetos evacuados há menos de uma hora da coleta, ou seja, estavam “molhados e alto teor de umidade” e sem formação de “casca”. Foram amostrados 10 estrumes individualmente para compor uma amostra de 1,5 kg. Todas as amostras foram acondicionadas em recipientes de plástico limpos e fechados, armazenados em caixa de isopor e levados para congelamento em um freezer a T°C (-18).

4.2.2 Amostras “lactante“ (Vacas em Lactação)

Os dejetos oriundos das vacas lactantes foram coletados no recinto de ordenha. Objetivou-se colher o dejetos no momento da ordenha com a intenção de obter o substrato bastante “fresco”, assim como na coleta anterior, padronizando o estado de conservação do dejetos. Foram amostrados 10 estrumes individualmente para compor uma amostra de 1,5 kg. Todas as amostras foram acondicionadas em recipientes de plástico limpos e fechados, e acondicionados em caixa de isopor e levados para congelamento em um freezer a T°C (-18).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS DEJETOS E DO INÓCULO

Os substratos (amostras dos dejetos de lactação e não lactação) foram caracterizados em relação à série de sólidos, de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). As análises de proteína bruta, extrato etéreo, fibra bruta, sais minerais e umidade, foram realizadas por laboratório certificado.

O inóculo (lodo granular anaeróbio) foi proveniente de reator Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) tratando efluente de abatedouro de aves (Avícola Ideal, Pereiras-SP), seguindo o mesmo método de caracterização de sólidos do substrato.

As análises bromatológicas das fezes bovinas, da silagem de milho, a qual representa a fração de volumosos da dieta L e da forragem (*Braquiária brizantha*), esta representando a dieta NL, foram analisadas, também por um laboratório certificado. As amostras das fezes foram analisadas no seu estado físico original, denominada “amostra úmida” e após secagem em estufa a 60 °C por 16 a 24 horas ou até atingirem peso constante (variação inferior a 0,1% para 2duas pesagens sucessivas), denominada amostra seca.

4.4 PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS ENSAIOS DE PBM

Os ensaios de potencial bioquímico de metano (PMB) foram realizados em triplicatas, em frascos de ensaios de borossilicato, simulando reatores em bateladas. Foram utilizados frascos com volume total de 250 mL com tampa de rosca e septo de borracha para vedação. Os experimentos foram realizados em sistemas de mono-digestão utilizando o inóculo e um dos substratos de dejetos bovino em cada estação climática.

Em cada ensaio foram adicionados 125 ml de volume útil total, sendo o volume de headspace de 125 ml, destinado ao acúmulo de biogás. A concentração de biomassa no interior de cada frasco foi definida em função da metodologia VDI4630 que preconiza a realização de ensaios de potencial bioquímico de metano (PBM) na proporção 2:1 em termo de sólidos voláteis totais (SV) para o inóculo e substrato, respectivamente, conforme Deutscher (2006). Os ensaios de PBM foram operados a 35°C, com agitação de 20 rpm com o auxílio de uma incubadora refrigerada do tipo shaker.

A determinação do volume e a coleta de biogás foi realizada utilizando uma seringa da marca Hamilton S500, com volume total de 500 ml. O biogás gerado foi acondicionado em tubos de coleta, diariamente nos primeiros dias de ensaio, e semanalmente e quinzenalmente ao longo do tempo experimental. O biogás gerado foi enviado para análise em cromatografia gasosa, utilizando o equipamento GC-2030, Nexis da Shimadzu®.

A Tabela 5 detalha as proporções adicionadas em cada reator, a partir da concentração de sólidos voláteis totais (SVT).

Tabela 5 - Detalhamento experimental dos ensaios de PBM

Cenário	Ensaio	Inóculo (ml)	Substrato (g)
Verão	Lactação	107	18
	Não Lactação	104	21
Inverno	Lactação	109	16
	Não Lactação	108	17
Primavera	Lactação	101	24
	Não Lactação	99	26
Outono	Lactação	101	24
	Não Lactação	104	21

Fonte: Autor (2024).

Os testes de controle positivo (CP) foram realizados utilizando celulose microcristalina como parâmetros de máxima produção de biogás. Os testes de controle negativo (CN) foram realizados utilizando somente inóculo como parâmetros de atividade endógena do mesmo (Tabela 6).

Tabela 6 - Detalhamento dos controles utilizados nos ensaios de PBM

Cenário	Controle	Inóculo (ml)	Celulose (g)
Verão/inverno	Positivo	125	3,46
	Negativo	125	-
Primavera	Positivo	125	2,90
	Negativo	125	-
Outono	Positivo	125	3,00
	Negativo	125	-

Fonte: Autor (2024).

4.5 TRATAMENTO DOS DADOS

4.5.1 Análise cinética: modelagem de Gompertz

Com base nos dados experimentais da produção cumulativa de metano de cada condição experimental, a equação modificada de Gompertz (Equação 1) foi utilizada para estimar os parâmetros experimentais: potencial de produção de metano, taxa máxima de produção de metano e tempo da fase lag.

$$P_{CH_4}(t) = P_{max} * exp \left\{ -exp \left[\left(\frac{R_{max} * e}{P_{max}} \right) * (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Onde:

$P_{CH_4}(t)$ =é produção cumulativa de metano (NmLCH₄) no tempo

P_{max} =é potencial produção de metano (NmLCH₄)

R_{max} =é taxa produção máximo de metano (NmLCH₄ d⁻¹)

λ =é fase lag(d).

4.5.2 Análise estatística

Neste trabalho foram realizadas análises estatísticas utilizando o teste de Shapiro Wilk para verificar a normalidade dos dados. Para dados que não atenderam aos critérios de normalidade, foram utilizados os testes não paramétricos de Mann-Whitney para comparação de dois grupos de dados e Kruskal-Wallis para comparação de três ou mais grupos. O teste estatístico Dunn Test, foi aplicado para comparar pares de grupos e especificar quais os grupos que apresentam diferenças estatísticas significantes. Os testes estatísticos foram realizados utilizando o software R, adotando um intervalo de confiança 0,05.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE BROMATOLÓGICA DOS SUBSTRATOS

A análise bromatológica dos substratos tem a finalidade de auxiliar elucidar a contribuição individual de cada parâmetro e a interação entre eles em moldar a performance do processo de DA (Tabela 7).

Tabela 7 - Análise bromatológica das fezes (substratos)

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Proteína Bruta amostra seca (PB)	172	106	135	99	122	84	131	121
Proteína Bruta amostra original (PBOrig %)	2,6	1,3	2,3	1,4	1,9	1,4	2,2	1,5
Fibra Bruta amostra seca (FB)	331	249	266	291	379	228	277	218
Fibra Bruta amostra original (FBOrig)	5,1	3,1	4,5	4,1	6	3,8	4,8	2,8
Fósforo amostra seca (P)	6,21	7,34	4,56	6,55	7,09	4,85	6,87	4,36
Fósforo amostra original (POrig)	1	0,9	0,8	0,9	1,1	0,8	1,2	0,6
Extrato Etéreo amostra seca (EE)	18	20,66	14,79	29,93	15,79	24,18	15,79	28,98
Extrato Etéreo amostra original (EEOrig)	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
Magnésio amostra original (MgOrig)	0,4	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Cálcio amostra seca (Ca)	4,71	10,28	5,89	8,95	3,58	9,39	12,4	7,72
Cálcio amostra original (CaOrig)	0,7	1,3	1	1,3	0,6	1,6	2,1	1
Matéria Mineral amostra seca (MM)	99,1	189,5	80,5	157,1	94,3	177,5	108,4	192,8
Matéria Mineral amostra original (MMOrig.)	1,5	2,4	1,4	2,2	1,5	3	1,9	2,5

Fonte: O autor (2024).

Observações: Valores de Proteína Bruta Original (PBOrig) estão representados em %. Os demais valores estão representados em g/kg. ; Amostra seca: Estufa 65°C por 16 horas + 5 g desta por mais 5 horas ; Amostra original: Umidade natural

Nos próximos subtópicos discutiremos individualmente, a influência de cada parâmetro bromatológico nos substratos. No subtópico 5.4, discutiremos conjuntamente a relação desses parâmetros com as produções de biogás e metano

5.1.1 Proteína bruta amostra seca (PB) e proteína bruta amostra original (PBOrig.), nitrogênio total (N) e sólidos voláteis (SV)

O conteúdo de proteína bruta foi determinado tanto para a amostra seca (PB) quanto para a amostra original (umidade original), conforme tabela 8. Discutiremos os valores da amostra original (PBOrig.), pois existe a possibilidade da secagem subestimar os valores de PB da amostra seca ao induzir a volatilização de compostos nitrogenados.

Tabela 8 - Proteína bruta amostra original (PBOrig.) em porcentagem (%), N (g/Kg), SV (%), nas fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações climáticas

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Proteína Bruta amostra original (PBOrig) (%)	2,6	1,3	2,3	1,4	1,9	1,4	2,2	1,5
Nitrogênio total (g/kg)	27,9	17,2	22	16,1	19,8	13,1	21,3	19,7
SV (%)	11,19	9,47	10,02	11,48	13,35	12,12	14,30	8,86

Fonte: Autor (2024).

A relação entre proteína bruta (PBOrig.) e nitrogênio (N) considera que a proteína é composta de 16% de nitrogênio total. Assim, as discussões sobre a PBOrig. se aplicam ao N.

Os resultados indicam que nas quatro estações climáticas os teores de PBOrig. excretados nas fezes originadas das dietas L foram superiores em comparação às L em 100%, 64 %, 35,7 % e 46,6 %, no verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Tal comportamento pode ser justificado pelo fato da dieta L possuir maiores teores de proteína decorrente da presença de 40% de concentrados (farelo de soja, milho moído, farelo de trigo, etc), somado ao fato desta conter altos teores de carboidratos de rápida degradação (ex.amido), portanto maior densidade energética, maior digestibilidade, resultando no maior consumo e maior excreção de nutrientes nas fezes, incluindo a PBOrig. Complementarmente, a seleção de bactérias amilolíticas (hidrolisam amido), intensificam a produção de propionato (C3), podendo resultar acúmulo de AGCC (AGV), redução de pH e desfavorecimento da eficiência degradativa ruminal (conforme explicado no tópico 3, subtópico 3.7). Ademais, no sistema de manejo adotado nesta propriedade, o Compost Barn, as vacas lactantes (dieta L) ficam confinadas sob condições climáticas controladas, como o uso de ventilação. Nessas condições o consumo voluntário da dieta L também é estimulado, incrementando as excreções. Mesmo que haja bom aproveitamento da proteína para produção de leite, uma porcentagem será excretada. Sarolli (2005), apresenta que animais estabulados recebendo altos níveis de alimentação terão produção mais elevada de dejetos do que animais mantidos em regime de pastejo.

Em contrapartida, a dieta NL, composta de forragem (braquiária), possui reduzidos teores iniciais de proteína comparados à dieta L, e elevados teores carboidratos estruturais (CE), menor digestibilidade, lenta degradação, lenta passagem pelo TGI, redução de consumo, menor excreção nas fezes. Segundo Cardoso (2014), a redução do consumo se deve, também, à ingestão de teores críticos de PB, sendo o limite crítico para os ruminantes mais baixo devido à síntese de proteína microbiana.

O menor valor de PBOrig. excretado ocorreu na combinação NL/verão (1,3%), ou seja, houve bom aproveitamento e menor excreção. A boa qualidade nutricional e energética da forragem no verão pode ter proporcionado bom aproveitamento da proteína dietética para crescimento microbiano.

Quanto ao SV, estes foram superiores na dieta L em relação à NL no verão, inverno e primavera. Entretanto, o SV do outono da dieta L foi menor em comparação ao SV da dieta NL mesmo a dieta L excretando maior PBOrig. (2,3%). Isto sugere que outros parâmetros nutricionais que compõem os SV da dieta NL foram excretados em maiores proporções. Observando a tabela 7, podemos verificar que nesta combinação NL/outono, foram excretados elevados EE (29,93 g/Kg) e EEOrig. (0,4 g/Kg), que são os maiores valores dentre os demais. Esta elevada excreção de EE e EEOrig. oriunda das dietas NL é decorrente do menor requerimento desta fonte energética pelas vacas não lactantes.

5.1.2 Fibra bruta da amostra seca (FB) e fibra bruta da amostra original (FBOrig.)

A FB das fezes originadas das dietas L foram superiores à NL no verão, inverno e primavera em 32,9%, 66,2%, 27%, respectivamente. No outono, houve uma inversão, a FB originada das fezes da dieta NL foram superiores à L em 9,3%. Para FBOrig. em todas estações as fezes originadas das dietas L apresentaram teores superiores em relação às originadas da dieta NL, em 64,5%, 9,75%, 57,89% e 71,4%, respectivamente. (Tabela 9)

Tabela 9 - Teores de FB (g/Kg) e FBOrig.(g/Kg) nas fezes originadas das dietas L eNL coletadas nas quatro estações

	verão		outono		inverno		primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
FB	331	249	266	291	379	228	277	218
FBOrig. g/Kg	5,1	3,1	4,5	4,1	6	3,8	4,8	2,8
SV (%)	11,19	9,47	10,02	11,48	13,35	12,12	14,30	8,86

Fonte: Autor (2024).

De acordo com Silva e Queiroz (2002) apud Sarolli (2005), o termo fibra bruta representa as frações de celulose e lignina insolúveis, sendo a parte dos carboidratos resistente ao tratamento ácido e alcalino, correspondendo majoritariamente à fração fibrosa dos alimentos e substratos.

A princípio, era de se esperar que as fezes oriundas das dietas NL (pastejo direto sobre a forração) apresentassem maiores excreções de FB e FBOrig. em relação à dieta L. Porém,

ainda que a dieta L possua menor proporção de volumoso (V), ela ainda possui 60% (V), o qual contém fibra oriunda da silagem de milho. Conforme explicado no tópico 3, subtópico 3.7, a maior densidade energética (40% de concentrado), das dietas L, através de uma cadeia de eventos, pode implicar na redução da eficiência degradativa ruminal, menor aproveitamento da dieta e maior excreção de nutrientes no substrato.. Neste caso, o substrato originado da dieta L foi incrementado FB e FBOrig. Devemos considerar, também, que a fibra presente nas dietas NL (pastejo direto sobre a forração), embora menos biodegradáveis (maiores teores de lignina), têm taxa de passagem pelo TGI mais lenta, fato que pode favorecer da sua digestão, e sua menor excreção nas fezes.

5.1.3 Fósforo amostra seca (P) e fósforo amostra original (POrig.)

As excreções de P e de POrig. foram maiores nas fezes originadas da dieta L em relação à NL no inverno e na primavera, em 46,18 % e 57,56 %, respectivamente (Tabela 10). A dieta L composta com maior proporção de concentrados, é mais rica em P (fósforo). Por ser constituída por carboidratos não estruturais, menos fibrosos e mais solúveis, apresenta maior digestibilidade, e, conforme explicado no subtópico anterior, seu consumo resultará em maior excreção deste nutriente. A dieta NL é composta apenas pela forragem (braquiária), na qual o teor de P é, comparativamente, reduzido. Esta tendência da dieta L excretar mais P em relação à NL, seria a mesma para todas as estações climáticas, acaso as condições ambientais, principalmente T°C, fossem as mesmas, haja visto que a composição das dietas L e da dieta NL são fixas nas quatro estações.

Tabela 10 - Fósforo amostra seca (P) e Fósforo amostra original (POrig.), em g/kg, registrados das fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Fósforo amostra seca (g/kg)	6,21	7,34	4,56	6,55	7,09	4,85	6,87	4,36
Fósforo amostra original (g/kg)	1	0,9	0,8	0,9	1,1	0,8	1,2	0,6

Fonte: Autor (2024).

Entretanto, de modo contrário, no outono e no verão, as excreções de P foram maiores nas fezes originadas da dieta NL em relação à L em 43,60% e 18%, respectivamente, indicando menor excreção deste elemento nas fezes originadas da dieta L. As vacas lactantes, (dieta L), estão sob ventilação (sistema Compost Barn) que garante conforto térmico e, comumente não apresentam alterações de comportamento, como, por exemplo, redução de ingestão para reduzir

incremento calórico afim de evitar o estresse térmico. Assim, uma eficiente fermentação ruminal garantiu bom aproveitamento do P contido nessa dieta, o qual foi direcionado para incrementar a produção de leite. Desta forma, houve redução na sua excreção. Em complemento, as vacas não lactantes (NL), além de não estarem produzindo leite, e assim não direcionarem o P para esta finalidade, têm a eficiência do sistema ruminal reduzida, pois pastam sob o sol. Altas T°C foram registradas no verão de 2023 e outono do ano de 2024 devido ao efeito El Niño, podem ter induzido a uma redução do consumo afim de reduzir o incremento calórico, assim como o metabolismo, afim de manter a homeotermia. Desta forma, deixam de atender aos requerimentos mínimos da comunidade microbiana ruminal. A pastagem, nesses meses, ainda apresenta bons teores de nutrientes, inclusive o P. Assim, ainda que tenha havido redução de consumo da pastagem, o P contido não foi bem aproveitado, sendo excretado.

Em síntese, a maior excreção de P da dieta NL em relação à L, no verão e outono, se justifica pelo maior aproveitamento deste nutriente pela vacas lactantes (L), menor requerimento e não aproveitamento do mesmo pelo sistema digestivo pelas vacas não lactantes (NL).

5.1.4 Extrato etéreo (EE) e extrato etéreo amostra original (EEOrig.)

Em relação ao EE, observa-se que nas quatro estações, os teores deste parâmetro excretados nas fezes originadas da dieta NL, foram superiores em 14,77 %, 102,3 %, 53,13 %, 83,53 %, respectivamente, quando comparados com a dieta L (Tabela 11)

Tabela 11 - Extrato etéreo (EE) e extrato etéreo amostra original (EEOrig.), em g/kg, registrados nas fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
EE (g/kg)	18	20,7	14,8	29,9	15,8	24,2	15,8	29
EEOrig. (g/kg)	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4

Fonte: Autor (2024).

A dieta L possui originalmente maiores teores de EE (fosfolipídeos, ácidos graxos, ceras), em relação à dieta NL (forração). O fato da dieta NL ter excretado maiores teores deste parâmetro em relação à L, deve ser justificado pelo maior aproveitamento deste na dieta L afim de atender ao maior requerimento energético para a produção de leite. O valor energético do

EE é 2,25 vezes superior ao das proteínas e dos carboidratos. Esta maior utilização resulta em menores excreções. As vacas não lactantes (dieta NL), não apresentam esta necessidade, e assim, excretam o pouco que está presente na forração.

Os teores de EEOrig. excretados nas fezes originadas das dietas L e NL foram iguais ao longo das quatro estações, indicando que a umidade contida na amostra original pode não ser precisa, não sendo recomendada para esta avaliação deste parâmetro.

5.1.5 Magnésio amostra original (MgOrig)

Os dados referentes às excreções de MgOrig. revelam que não houve diferença de excreções para este nutriente nas coletas de inverno e primavera, quando comparadas as fezes oriundas das dietas L e NL (Tabela 12).

Tabela 12 - Magnésio amostra original (MgOrig) registrados nas fezes originadas das dietas L e NL dietas L e NL coletadas nas quatro estações

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Magnésio amostra original (g/Kg)	0,4	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6

Fonte: Autor (2024).

Com relação às fezes colhidas no outono e verão, as originadas da dieta NL (a pasto), excretaram mais MgOrig. (33,3 % e 37,5 % a mais) em comparação à dieta L. Os teores de Mg nas forragens são, em média, superiores aos encontrados nas dietas com concentrados, pois este elemento é um macronutriente essencial aos vegetais e é suprido via solo. No verão e outono as forragens absorvem maiores teores de magnésio do solo decorrente das maiores precipitações nestas estações, excretando maiores teores deste nutriente. Ademais, as dietas NL apresentam reduzida digestibilidade, favorecendo a excreção deste nutriente.

5.1.6 Cálcio amostra seca (Ca) e cálcio amostra original (CaOrig.)

As análises revelaram que os teores de cálcio Ca e CaOrig. foram superiores nos dejetos oriundos da dieta NL em relação às excreções originadas da dieta L no verão, outono e inverno (Tabela 13). Contrariando esta tendência, na primavera, a excreção de Ca na dieta L foi maior em comparação à NL, como foi também a maior excreção deste nutriente entre todas as amostras em valor absoluto (12,4g/Kg).

Tabela 13 - Cálcio amostra seca (Ca) e cálcio amostra original (CaOrig.), em g/kg registrados das fezes originadas das dietas L e NL coletadas nas quatro estações

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Ca amostra seca (g/kg)	4,71	10,28	5,89	8,95	3,58	9,39	12,4	7,72
Ca amostra original (g/kg)	0,7	1,3	1,0	1,3	0,6	1,6	2,1	1,0

Fonte: Autor (2024).

A justificativa para as menores excreções de Ca observadas nas fezes oriundas das dietas L no verão outono e inverno, é o maior requerimento deste nutriente para as vacas lactantes. Para a dieta NL a excreção foi a mais alta (10,28 g/Kg) devido ao fato dessas vacas não estarem lactando. A inversão de comportamento ocorrida na primavera somente se justifica por uma baixa digestibilidade desta dieta, induzindo a uma passagem mais rápida pelo TGI resultando em um menor aproveitamento deste nutriente e maior excreção. O comportamento do parâmetro CaOrig. nas excreções foi o mesmo em relação ao Ca. Os altos teores de Ca e CaOrig. na combinação NL/verão (10,28 g/Kg) é um dos fatores que influenciaram positivamente nas produções acumuladas de biogás e produção máxima específica de metano nesta combinação e o menor valor deste nutriente (4,71 g/Kg) nas fezes originadas da combinação L/verão, por uma interação de fatores, não foi determinante para a redução das suas produções de biogás e de metano.

5.1.7 Matéria mineral amostra seca (MM) e matéria mineral amostra original (MMOrig.)

A MM corresponde aos sólidos fixos (SF), ou cinzas. É composta por minerais inorgânicos como sais de potássio, cálcio, magnésio, fosfatos, silicatos, óxidos, advindos da dieta ou como contaminantes externos. O conteúdo MM e MMOrg. das fezes originadas das dietas NL nas quatro estações foram maiores que as dietas L (Tabela 14), Esse fato representa que o processo degradativo ruminal das dietas NL (maiores teores de compostos fibrosos) foi menos eficiente em relação à dieta L, resultando em maior excreção desses compostos e ajudará justificar suas menores produções de biogás e de metano, em relação às dietas L. Os resultados da análise de MMOrg. revelam valores muito inferiores à MM, devido ao fato do conteúdo aquoso da amostra original atuar como diluente do percentual total dos inorgânicos analisados, visto que o resultado se refere ao percentual em relação a massa total de dejetos bovino analisada

Tabela 14 - Matéria Mineral (MM) e Matéria Mineral da amostra original (MMOrig.), oriundas das dietas L e NL, ao longo das quatro estações

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
MM (g/Kg)	99,1	189,5	80,5	157,1	94,3	177,5	108,4	192,8
MMOrig. (g/Kg)	1,5	2,4	1,4	2,2	1,5	3	1,9	2,5

Fonte: Autor (2024).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS EM RELAÇÃO À SÉRIE DE SÓLIDOS TOTAIS (ST), SÓLIDOS VOLÁTEIS (SV) E SÓLIDOS FIXOS (SF)

Os substratos (amostras de fezes) e inóculo foram caracterizados quanto ao seu teor de ST, SV e SF, previamente à realização dos ensaios PBM (Tabela 15). A determinação da série de sólidos do inóculo é fundamental para a montagem experimental dos ensaios de PBM, visto que na metodologia escolhida para este trabalho os sistemas de DA são operados em uma relação de 2:1 em termos de SV do inóculo e do substrato.

O conteúdo de ST corresponde a matéria sólida contida nos dejetos e que permanece após a retirada da umidade (Hoffman, 2019). São constituídos de uma fração orgânica, denominada sólidos voláteis (SV), podendo representar de 70 a 80 % do ST, composta por fibras não digeridas no processo digestivo, como celulose, hemicelulose, lignina, microrganismos ruminais, sobras de proteínas e lipídeos não degradados, resíduos metabólicos e celulares e uma fração inorgânica, denominada sólidos fixos (SF), que podem representar de 20 a 30 % do ST, sendo constituídos por minerais como cálcio, fósforo, magnésio, potássio, sódio e materiais inertes, como argilas, areias etc.

A análise do teor de SV indica a quantidade de matéria orgânica presente no substrato com potencial para ser biometanizada pelos consórcios microbianos.

Tabela 15 - Sólidos em porcentagem (%) dos substratos e inóculo, para dietas L e NL.

	Inóculo	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
		L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
ST (%)	5,54	13,47	12,5	13,4	14,41	16,35	16,23	17,01	15,30
SV (%)	3,80	11,19	9,47	10,02	11,48	13,35	12,12	14,30	8,86
% de SV no ST	68	83	76	75	80	82	75	84	58
SF (%)	1,74	2,27	3,03	3,38	2,93	2,99	4,10	2,7	6,43

Fonte: Autor (2024).

Ripp (2019), caracterizou dejetos brutos de bovinos de leite em condições similares às nossas, ou seja, confinados no sistema Compost Barn, alimentados com dieta contendo ração,

silagem, e sal mineral (similar à nossa dieta L) registrou ST 31,29% e SV 24,21%, valores superiores aos nossos. No sistema de semiconfinamento, a mesma autora encontrou ST (12,34%), SV (9,22%), valores mais próximos aos da nossa combinação NL/verão. Orrico Junior (2010), caracterizou dejetos produzidos por bovinos de corte alimentados com dietas contendo 60% de volumoso (V) e 40% de concentrados (C) e obteve ST 18,25% e SV 15,78%, valores bem próximos ao que obtivemos na combinação L/primavera. Demirci e Demirer (2004), registraram teores de ST (16,9 %) e SV (8,32%), valores aproximados à nossa combinação NL/primavera. Nandi *et al.* (2020) caracterizando esterco cru de vaca, encontraram teores de ST de 17,3% e SV de 14,51%, valores muito próximos aos nossos na combinação L/primavera.

A relação dos sólidos com os volumes acumulados de biogás e produções específicas de metano, serão discutidas no tópico 5.4, em conjunto com os parâmetros bromatológicos.

5.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS E PRODUÇÃO ESPECÍFICA DE METANO

Os volumes acumulados de biogás (VAB) dos ensaios de PBM foram avaliados por 130, 147, 133 e 113 dias, no verão, outono, inverno e primavera, respectivamente (tabela 16, figura 4).

5.3.1 Volume acumulado de biogás (VAB)

Tabela 16 - Volumes acumulados de biogás (VAB) registrados dos ensaios de PBM para as dietas L e NL em função das estações climáticas

Dieta	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
VAB (ml)	2150	1650	1185	1335	1350	860	2585	1812
Quantidade substrato (adicionado (g)-tab.6)	18	21	16	17	24	26	24	21
VAB (ml/g substrato)	119,44	78,57	74,06	78,53	56,25	33,07	107,71	86,30

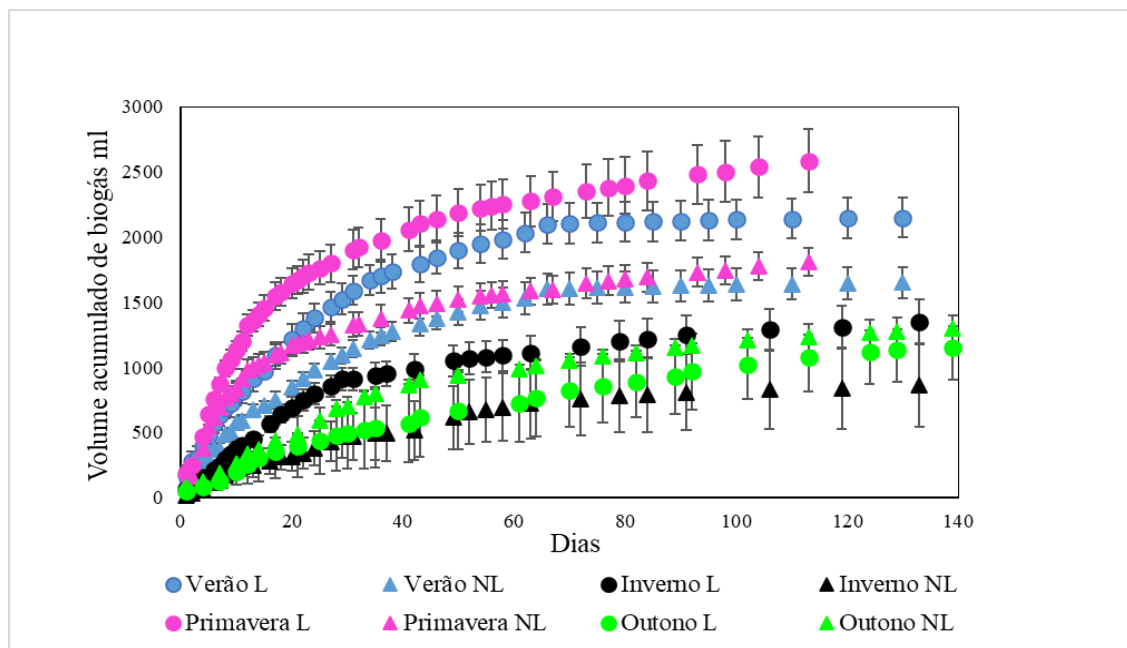
Fonte: Autor (2024).

Sarolli (2005), utilizando reatores de batelada (similar ao BPM), após 12 semanas (84 dias) em operação a T°C de 35 (mesma T°C do nosso shake), para dieta com 65% de concentrado e 35 % de volumoso (65 C : 35V) apurou produção acumulada de biogás de 0,01509 m³ ou 81,4 ml por g de esterco (utilizou 8 litros de substrato, este formado por 2 kg esterco bovino + 1,5 inóculo (biofertilizante) + 4,5 litros de água. Para comparar com nossos

resultados, temos que observar as dietas L (40 C : 60 V). No nosso trabalho, as dietas L produziram em ml/g de estrume (ou substrato) 119,44, 74,06, 56,25 e 107,71 no verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Desta forma podemos afirmar que nossos resultados não ficaram acentuadamente distantes aos da referida autora.

Miranda, Amaral e Lucas Junior (2006), em ensaios nos quais não foram identificados as dietas, apenas avaliou diferentes T°C com esterco bovino e suíno, alcançaram, para dejetos bovinos, produção acumulada de biogás de 0,0814 m³/Kg de estrume adicionado a T°C de 35 (ou 81,4 ml/g estrume), valores próximos às médias que registramos em ml/g nas combinações NL/verão, L e NL outono, NL/primavera (78,57, 74,06, 78,53, 86,30, respectivamente).

Figura 4 - Volumes acumulados de biogás (VAB) registrados dos ensaios de PBM para as dietas L e NL em função das estações climáticas



Fonte: Autor (2024).

Inicialmente observamos uma pequena sobreposição dos dados, o que representa a atividade endógena do inóculo (Ferraresi, 2021).

Até no sétimo dia, aproximadamente, as produções das dietas L e NL/primavera e as da dieta L/verão, registraram produções próximas. Em relação às demais, em ordem decrescente de produção, elas superaram as combinações NL/verão, L/inverno, NL/outono, L/outono e NL/inverno. A partir do décimo oitavo dia, aproximadamente, observamos as produções da dieta L/verão superar a dieta NL/primavera e as demais combinações mantiveram o comportamento inicial, sempre em crescimento relativamente regular.

A partir do trigésimo dia até o sexagésimo dia as combinações L/primavera e L/verão mantiveram boa performance em relação às demais, mas sempre a L/primavera com produção acima da L/verão, e as demais combinações mantiveram o um crescimento mais tímido, porém mantendo as diferenças entre si. Até o sexagésimo dia, as combinações L/outono e NL/inverno tiveram produções alinhadas, mas, a partir do octagésimo dia, L/outono superou NL/inverno. Do sexagésimo dia até o centésimo dia todas as combinações tiveram produções mais conservadoras. Ao septagésimo dia, aproximadamente, a NL/primavera e NL/verão se igualaram, mas, a partir desse ponto, a NL/primavera continuou superando a NL/verão. A partir do centésimo dia, até o centésimo vigésimo dia, a L/primavera, NL/primavera, L/outono e NL/outono continuaram crescimento, e as demais sinalizaram produções constantes (na curva representada por um platô). Souza C.S. *et al.* (2015) também registrou que no período primavera/verão foi observada maior degradação da biomassa.

Esta dinâmica acima descrita, é relatada por Metcalf, Eddy e Tchobanoglous (1991), Gerber e Span (2008), os quais explicam que, os ensaios metanogênicos possuem a presença de uma fase inicial de latência (fase *lag*) que, neste caso, ocorre discretamente nos primeiros dias e, em seguida, uma fase de aumento rápido de produção, seguida de uma fase de estabilização, como observado de forma mais evidente próximo ao término do tempo de ensaio.

5.3.2 Produção específica de metano (PEM)

As produções específicas de metano (PEM) estão representadas na tabela 17, figura 5.

Tabela 17 - Produção específica de metano (PEM - ml NCH₄/g SV) e teores de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) no biogás produzido das fezes originadas das dietas L e NL, coletadas nas estações climáticas do verão, outono, inverno e primavera

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
PEM (ml NCH ₄ /g SV)	407,65	388,89	122,1	145,13	218,38	184,60	219,40	208,56
CH ₄ (%)	41,85	46,76	40,24	41,16	39,43	48,55	44,72	45,2
CO ₂ (%)	17,5	20,19	17,27	22,30	15,70	21,54	24,53	30,52

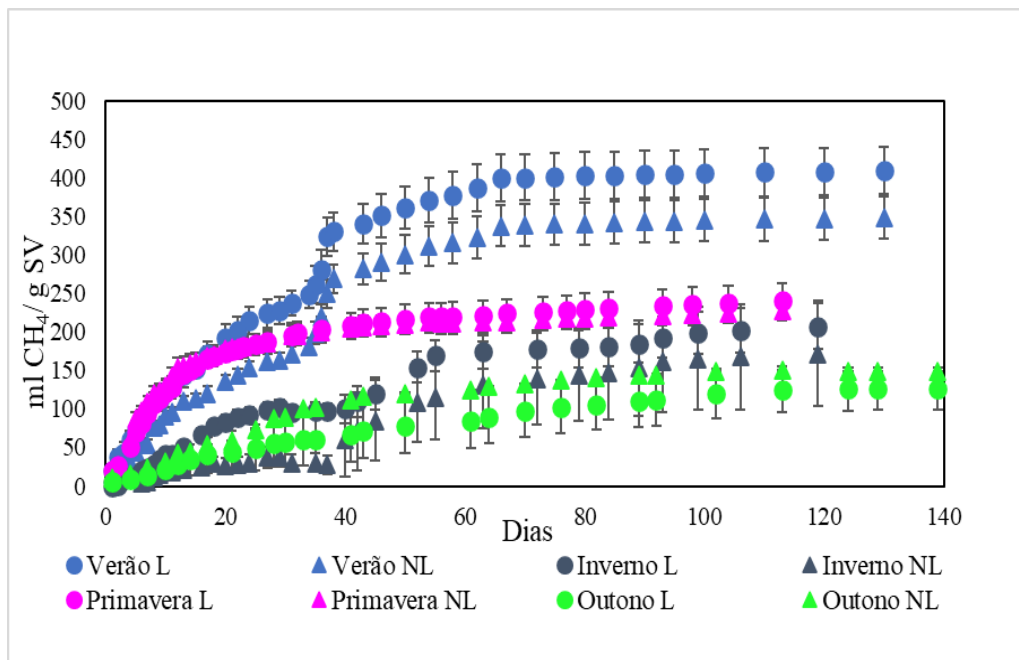
Fonte: Autor (2024).

Ripp (2019), em condições similares às nossas, ou seja, utilizando dejetos brutos de bovinos de leite confinados no sistema Compost Barn, alimentados com dieta contendo ração, silagem, e sal mineral (similar à nossa dieta L) registrou em testes de PBM, PEM de 110,00 ml N CH₄ g SV⁻¹, valor inferior aos do nosso trabalho. Moller, Sommer e Ahring (2004) apud

Orrico Júnior, Amorim e Lucas Júnior (2010) em trabalho cuja estação climática não foi especificada, encontraram potencial de produção de metano de 100 ml/g SV⁻¹ adicionado, para uma dieta 100% de volumoso, similar à nossa dieta NL (tabela 19). Galbiatti *et al.* (2009) registrou teores médios de metano de 70,6% e 77,7% aos 113 e 127 dias após enchimento do biodigestor, respectivamente, teores superiores aos obtidos no nosso trabalho.

A Figura 5, representa a PEM em termos de SV, obtidas das combinações dos substratos oriundos das dietas ministradas às vacas lactantes (L) e não lactantes (NL) coletadas ao longo das estações do ano.

Figura 5 - Produção específica de metano (PEM) registrados nos ensaios de PBM para as dietas L e NL em função das estações climáticas



Fonte: Autor (2024).

O gráfico de PEM (figura 5), em conjunto com a tabela 19, nos elucidam do início dos testes até o vigésimo dia uma rápida e ascendente produção de metano decorrente das combinações L/primavera, NL/primavera, L/verão e NL/verão, indicando uma discreta fase de adaptação do inóculo aos substratos (fase Lag). Para as demais combinações esta fase foi mais presente, sobretudo até o sétimo dia. Essas combinações NL e L verão e NL/L primavera, também sobressaíram em relação às demais até ao final dos testes. Entretanto, aproximadamente ao quarentésimo dia, ocorreu um pico de produção (fase exponencial) das dietas L e NL/verão e a combinação NL/verão superou as combinações NL e L/primavera, se alinhando à combinação L/verão, permanecendo alinhadas até ao final dos testes, mas com a

dieta NL/verão sempre abaixo da L/verão. Também a partir do quarentésimo dias de testes, as dietas L e NL/primavera caminharam juntas exibindo um crescimento tímido e com muita pouca diferença de produções entre elas. Deste modo, seguiram até ao final dos testes.

Até o quarentésimo dia, as produções das dietas L e NL/ outono apresentaram PEM intermediárias entre L/inverno (superior) e NL/inverno (inferior), porém, muito próximas. Do quarentésimo dia ao octagésimo dias as dietas L e NL/inverno seguiram com maiores produções, embora pouco acentuadas, em relação às L e NL/outono até o final das medições.

A partir do sexagésimo dia, para todas as combinações percebemos uma estabilização no crescimento das produções (fase estacionária).

5.4 DISCUSSÃO DAS RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS BROMATOLÓGICOS, SÓLIDOS VOLÁTEIS (SV), METANO (CH₄), DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂), COM OS VOLUMES ACUMULADOS DE BIOGÁS (VAB) E PRODUÇÕES ESPECÍFICAS DE METANO (PEM)

De acordo com Gueri, Souza e Kuczman, (2017) citando Park (2012), o metabolismo pleno é alcançado perante a presença de macro e micronutrientes, crescimento e atividade bacteriana, sendo o carbono, nitrogênio e o fósforo, e outros minerais como enxofre, ferro, potássio, sódio, cálcio e magnésio, originados da hidrólise dos carboidratos, proteínas e dos lipídios, os principais nutrientes para a vida dos microrganismos anaeróbios. Quando em níveis balanceados, influenciam positivamente o processo de digestão e de produção de biogás.

Tabela 18 - Resultados das análises bromatológicas para PB, PBO_{orig}., N total, FB, FBO_{orig}., P, PO_{orig}., EE, EEO_{orig}., Mg_{orig}., Ca, Ca_{orig}., MM, MMO_{orig}., CH₄, CO₂, SV, volume acumulado de biogás (VAB) e produção específica de metano (PEM)

(continua)

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
PB (g/kg)	172	106	135	99	122	84	131	121
PBO _{orig} (%)	2,6	1,3	2,3	1,4	1,9	1,4	2,2	1,5
Nitrogênio total (g/kg)	27,9	17,2	22	16,1	19,8	13,1	21,3	19,7
FB (g/Kg)	331	249	266	291	379	228	277	218
FBO _{orig} . (g/Kg)	5,1	3,1	4,5	4,1	6	3,8	4,8	2,8
P (g/kg)	6,21	7,34	4,56	6,55	7,09	4,85	6,87	4,36
PO _{orig} . (g/kg)	1	0,9	0,8	0,9	1,1	0,8	1,2	0,6
EE (g/Kg)	18	20,66	14,79	29,93	15,79	24,18	15,79	28,98
EEO _{orig} (g/Kg)	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4

Tabela 18 - Resultados das análises bromatológicas para PB, PBOrig., N total, FB, FBOrig., P, POrig., EE, EEOrig., MgOrig., Ca, CaOrig., MM, MMOrig., CH₄, CO₂, SV, volume acumulado de biogás (VAB) e produção específica de metano (PEM)

(conclusão)

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
Magnésio amostra original (MgOrig.) (g/Kg)	0,4	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Cálcio (Ca) amostra seca (g/kg)	4,71	10,28	5,89	8,95	3,58	9,39	12,4	7,72
Cálcio (Ca) amostra original (g/kg)	0,7	1,3	1,0	1,3	0,6	1,6	2,1	1,0
Matéria mineral - MM (g/Kg)	99,1	189,5	80,5	157,1	94,3	177,5	108,4	192,8
MM amostra original MMOrig.(g/Kg)	1,5	2,4	1,4	2,2	1,5	3	1,9	2,5
CH ₄ (%)	41,85	46,76	40,24	41,16	39,43	48,55	44,72	45,2
CO ₂ (%)	17,5	20,19	17,27	22,30	15,70	21,54	24,53	30,52
SV (%)	11,19	9,47	10,02	11,48	13,35	12,12	14,30	8,86
VAB (ml)	2150	1650	1185	1335	1350	860	2585	1812
PEM (mlNCH ₄ /g SVT)	407,65	388,89	122,1	145,13	218,38	184,60	219,40	208,56

Fonte: Autor (2024).

5.4.1 Relação dos parâmetros bromatológicos, SV, com o VAB

Podemos observar, na Tabela 18, que no verão, inverno e primavera, as fezes originadas da dieta L produziram valores superiores de VAB em relação à NL em 30,3%, 56,97%, 42,66%, respectivamente.

As fezes originadas das dietas L no verão, inverno e primavera apresentaram maiores teores de SV em relação às fezes originadas das dietas NL, o que seria natural para todas as estações climáticas analisadas, em decorrência da dieta L possuir maior densidade nutricional, energética e maior digestibilidade, fato que, conforme já discutido, poderá desencadear, ao final de uma cadeia de eventos, menor eficiência ruminal e maiores excreções desses nutrientes, os quais elevarão os SV desses substratos.

A dieta L é composta por 40 por cento (%) de alimentos concentrados (C) e 60 % de volumosos (V). A dieta NL possui apenas volumosos V (100 %), conforme elucidada a tabela 19.

Tabela 19 - Composição das dietas L e NL em kg por vaca/dia e respectivas porcentagens (%) de volumosos (V) e concentrados (C)

			%	% V	% C
Dieta L	25 kg silagem de milho	V	61,4	61,4	38,7
	08 kg cevada	C	19,6		
	3 kg de farelo de soja	C	7,36		
	4 kg de grão úmido de milho	C	9,82		
	250 gramas de núcleo mineral	C	0,61		
	0,5 kg Sal mineral	C	1,23		
soma C			38,7		
Dieta NL	Forragem (Braquiária brizantha) *Suplemento inverno (sal proteinado)	V	100	100	0

Fonte: Autor (2024).

Legenda: *Não altera a proporção de V/C

Considerando os parâmetros bromatológicos que compõem esses SV, podemos observar valores superiores nos substratos originados das dietas L de PBOrig., N (advindo da degradação da PBOrig.), P e POrig., em relação à NL. Esses parâmetros foram determinantes para proporcionar os VAB superiores. Embora o P da dieta L no verão tenha sido numericamente inferior ao P da NL, a diferença foi a menor quando comparo o P entre L e NL (6,21g/Kg e 7,34 g/Kg, respectivamente). Importante observar, também, que a FB e FBOrig. das dietas L foram superiores às NL, nessas estações, fato que pode parecer uma contradição, haja visto que a dieta NL (pastejo direto na forragem) terá sempre, inicialmente um valor de fibras superior. Entretanto essa fibra veio da silagem que faz parte da dieta L (60% de volumoso), e não da fibra da forragem (dieta NL). Ao não ser bem digerida no processo digestivo ruminal, por motivos já explicados, a FBOrig. foi excretada nas fezes originadas das dietas L, que ao serem submetidas aos ensaios de PBM, contribuíram com os VAB, pois é uma fibra mais biodegradável quando comparada à fibra das forragens.

Em síntese, maiores excreções decorrente da elevada densidade energética e nutricional comuns da dieta L que incrementam os valores de SV (PBOrig., N, P, POrig.), somados à FB e FBOrig. das dietas L (possuidoras de boa degradabilidade), contribuíram para os maiores VAB nessas combinações.

Segundo o NRC (1996), a densidade energética da dieta tem relação direta com o consumo (IMS), sendo este favorecido pelo fornecimento de dietas providas de altos teores de energia e de alta digestibilidade, as quais regulam a ingestão de matéria seca (IMS) ao suprir as exigências energéticas do animal, mas também por razões metabólicas. Por outro lado, dietas com baixa digestibilidade, e conseqüentemente pouco favorecidas em energia, limitam o consumo por enchimento do rúmen (limitação física) reduzindo também a taxa de passagem.

Entretanto, esta tendência das dietas L resultarem em SV mais elevados em relação às dietas NL, dependerá da interação de diversos fatores que podem alterar a digestibilidade das dietas, influenciando o consumo voluntário (IMS), os teores de nutrientes excretados. Dentre eles podemos citar processos inibitórios decorrente do acúmulo de AGCC que reduzem o pH ruminal, desfavorecendo o processo metanogênico, excesso de amônia (NH₃), assim como o estado de saúde do animal, o manejo, condições ambientais e, sobretudo, a T°C ambiente, a qual pode induzir os ruminantes a mudanças de comportamento ingestivo com o objetivo de regular a homeotermia alterando o aproveitamento e as excreções das dietas. Nessas condições será possível observar, por exemplo, a inversão da tendência acima relatada, ou seja, valores de SV em dietas NL superiores ao SV das L, como aconteceu em nosso trabalho, na estação do outono, na qual a dieta NL registrou SV (11,48%), valor superior à dieta L (10,02%), assim como o VAB da dieta NL (1335 ml) superior à L (1185 ml) em 12,65 %.

Avaliando os parâmetros bromatológicos, os maiores valores EE presente no substrato NL, os quais foram 102,36 % superiores em relação à dieta L e EEOrig. 33,3% superiores, respaldam este evento, pois o EE armazena elevada energia em suas ligações químicas. Segundo Sarolli (2005), substratos com altos teores de EE (gordura), apresentam elevado NDT (nutrientes digestíveis totais), visto que as gorduras fornecerem 2,25 vezes mais energia quando comparadas com os carboidratos e proteínas.

Outros parâmetros bromatológicos foram superiores nos substratos originados da dieta NL em relação à dieta L no outono, a citar, o fósforo (P) e (POrig.), Cálcio (Ca) e (CaOrig.) e (MgOrig.). Tais parâmetros fazem parte da fração inorgânica ou dos SF dos substratos excretados e foram relevantes para a nutrição do consórcio microbiano, resultando, posteriormente, em uma eficiente DA nos ensaios de PBM. Complementarmente, a dieta NL, por possuir maiores proporções de compostos fibrosos, seleciona bactérias fibrolíticas, as quais produzem mais acetato em relação a butirato e propionato, favorecendo a produção de metano ruminal, a qual se constitui em uma perda energética que reduz a eficiência da microbiota ruminal em fermentar os SV (fração orgânica biometanizável), resultando em menor aproveitamento e maior excreção dos nutrientes nas fezes, em uma estação na qual as forragens ainda apresentam bons atributos nutricionais.

Adicionalmente, dois fatores podem ter comprometido a eficiência degradativa ruminal culminando no maior valor de SV da dieta NL em comparação à L, no outono.

O pastejo diretamente sobre a forragem, sem muitas opções de sombreamento, torna esses animais mais vulneráveis às variações climáticas (neste caso altas T°C). As altas T°C observadas ao longo do outono de 2024, ainda influenciadas pelo El Niño, induziu à redução

de consumo, afim de reduzir o incremento calórico e manter a homeotermia. Assim, o aporte nutricional e energético (carbono) ao consórcio microbiano ruminal foi também reduzido limitando sua eficiência, resultando no menor aproveitamento dos SV que compõem a dieta e maior excreção desses. Olimpio Cruz (2021), explica que fatores estressores são aqueles que colocam o organismo em geral em situações de alerta. Nessas condições, respostas físicas e mentais são ativadas no intuito de manter a homeostase (ou homeotermia).

O segundo fator adicional é observar que as fezes oriundas da dieta L, no outono, registrou um SV relativamente baixo (10,02%), o menor comparado aos demais SV dentro da dieta L e o segundo menor SV dentre todas as combinações, sugerindo uma eficiente degradação da digesta (digestão microbiana e fermentação ruminal), a qual garantiu aporte energético suficiente para atender aos requerimentos microbianos, maior aproveitamento dos nutrientes (fração orgânica), menor excreção destes e redução dos SV nas fezes. O elevado consumo de água no outono (T°C médias altas devido efeito El Niño) também colaborou para o baixo teor de SV nas fezes originadas desta combinação.

Embora o mesmo comportamento (SV da dieta NL superior ao SV da L) fosse esperado no verão, estação na qual os mesmos argumentos, altas T°C e bons atributos nutricionais da forragem podem ser utilizados, no verão as condições de conforto térmico proporcionadas pelo sistema Compost Barn (ventilação) às vacas lactantes (dieta L), em conjunto com a maior densidade energética da dieta L, maior digestibilidade culminaram em menor aproveitamento e maior excreção dos SV da dieta L (11,19%) em relação à dieta NL (9,47%), resultaram no prevalecimento da tendência das dietas L produzirem fezes com maiores teores de SV em relação às NL.

De forma resumida, os motivos que influenciaram a maior VAB das dietas NL em relação à L, no outono, são a ineficiência ruminal causada pelo excesso de acetato, a redução de consumo para reduzir incremento calórico, resultando no menor aproveitamento dos SV e maior excreção desses. Foi também observado que as fezes oriundas da dieta L, no outono, com a qual estamos comparando, registrou um SV relativamente baixo (10,02%), o menor comparado aos demais SV dentro da dieta L e o segundo menor SV dentre todas as combinações, sugerindo bom aproveitamento da fração orgânica desta dieta e menor excreção de nutrientes nas fezes. O último fator comentado foi considerar que o elevado consumo de água no outono também colaborou para o baixo teor de SV nesta combinação.

Ao compararmos verão e inverno, que são as estações que comumente apresentam condições climáticas opostas, podemos observar que no verão, para dietas L, foram registrados VAB superiores em 59% em relação ao inverno (2150 ml no verão e 1350 ml no inverno), e

para dietas NL no verão, VAB superiores em 93% em relação ao inverno (1650 ml no verão e 860 ml no inverno). Ou seja, as fezes originadas tanto das dietas L, como das NL produziram mais biogás no verão. Esta afirmação pode ser justificada pela maior necessidade de termorregulação no inverno, ou seja, os ruminantes necessitam de mais energia para manter a T°C corporal dentro da zona de conforto térmico (homeotermia) e, para tanto, precisam metabolizar mais nutrientes da dieta. Em consequência, menos compostos biometanizáveis, os quais favoreceriam a DA por ocasião dos testes de PBM e a consequente formação de biogás, serão excretados nas fezes durante o inverno. Resende *et al.* (2015) apurou que a média diária de biogás produzido nos meses de verão $18,7(\pm 9,17)$ e inverno $16(\pm 6,2)$ L dia⁻¹, representaram diferenças significativas ($p < 0,0001$), indicando que a diferença de T°C de 29,5 para 19,5 resultou em redução na produção diária de biogás em 14,5%.

A combinação L/primavera registrou o maior valor de VAB (2585 ml) dentre todas as demais combinações. Esses substratos também apresentaram o maior SV (14,3%) dentre as demais combinações, o maior SV dentro das dietas L e a maior diferença de SV em porcentagem (%), da dieta L (14,3%) em relação à NL (8,86%), uma superioridade aproximada de 61%. Em termos bromatológicos, esse SV foi composto pela terceira maior PBO_{Orig.} (2,2%), o segundo maior N (21,3 g/Kg). Em termos de SF, apresentaram o maior Mg_{Orig.} (0,6 g/Kg), os maiores Ca e Ca_{Orig.} (12,4 e 2,1 g/Kg). PO_{Orig.} (1,2 g/Kg), o terceiro maior P (6,87 g/Kg). Este evento se justifica pela elevada excreção de SV (fração biometanizável) decorrente da alta produção de propionato (C3), conforme já explicado neste trabalho. Segundo Newbold *et al.* (2002), precursores do propionato reduzem a formação de metano ao utilizarem H₂. Arquéias utilizam, além de H₂, o acetato para produção de metano, evitando o acúmulo desses gases que resultam em acidificação do ambiente ruminal.

Em síntese, na combinação L/primavera, a interação entre condições de conforto térmico satisfatórias (no sistema Compost Barn, as vacas estão sob ventilação), podem ter resultado em maior consumo voluntário, maior produção de propionato (C3), acúmulo de AGCC, redução de pH e maior excreção de SV da dieta. De acordo com Lema e Méndez (1997); Paes (2003) apud Gueri, Souza e Kuczman, (2017), o pH influencia a produção do biogás assim como sua qualidade, pois valores de pH abaixo de seis resultam em redução de metano no biogás produzido. Concentrações de ácidos orgânicos acima da capacidade da comunidade microbiana específica em digerí-los, desestabiliza a fermentação. O desequilíbrio entre a produção de ácidos e de bicarbonatos na primeira etapa da digestão, onde o poder alcalinizante dos bicarbonatos não é suficiente para neutralizar os ácidos, resulta em queda no pH e favorecimento da fermentação. Paixão (2004), avaliou o efeito de duas fontes proteicas (farelo

de soja e ureia) e dois níveis de oferta de concentrado (0,75 e 1,25% do peso vivo) na dieta de novilhos confinados, sobre os consumos e digestibilidades aparentes totais da matéria seca (MS) e outros parâmetros, e relatou que os níveis de concentrado afetaram os consumos e as digestibilidade aparentes totais de todos os nutrientes estudados ($P < 0,05$). A digestibilidade parcial dos carboidratos não fibrosos (CNF) foi menor para o nível de concentrado mais alto e a fonte proteica, assim como a proporção de concentrado alterou o pH e o $N-NH_3$ ($P < 0,05$).

O excesso de amônia livre (NH_3), que é inibitório aos processos de DA (incluindo a ruminal), pode ser descartado, haja visto que a PB e PBO_{orig.} nas fezes, cuja degradação produz NH_3 , foram medianas (terceiras maiores).

A contribuição do EE e EE_{orig.} não foi determinante, pois o EE (15,79 g/Kg) representou o segundo menor valor dentre todas combinações e o valor de EE_{orig.} foi similar aos demais (0,3 g/Kg).

Quanto ao parâmetro FB (277 g/Kg), a quarta maior e FBO_{orig.} (4,8 g/Kg), a segunda maior, essas podem ter colaborado, pois, conforme comentado, são fibras da dieta L com maior digestibilidade (advindas da silagem) e podem ter sido convertidas em biogás. A celulose, de elevada proporção na fibra bruta, é satisfatoriamente convertida em biogás e metano pela microbiota anaeróbia do substrato, desde que os teores de N sejam satisfatórios. Nesta combinação L/primavera, o teores registrado de N foram o terceiro maior (21,3 g/Kg), mas muito próximo ao segundo maior (22 g/Kg).

Esses resultados indicam que, comumente, a interação de fatores são mais determinantes para as produções do que fatores isolados, mesmo quando são pronunciados.

Para o substrato originado da combinação NL/primavera foi registrado o SV (8,86%), o menor dentre todos os demais. Entretanto esta combinação registrou o terceiro maior VAB (1812 ml) dentre as demais combinações e o maior VAB dentro das dietas NL.

Sob o aspecto bromatológico, este SV foi constituído pelo segundo maior valor de EE (28,98 g/Kg), muito próximo ao maior valor de EE dentre todas combinações (29,93 g/Kg) e o mais alto EE_{orig.} (0,4 g/Kg). Tal fato indica que houve baixo aproveitamento digestivo e elevada excreção deste parâmetro. Já o EE da dieta L foi o segundo mais baixo (15,70 g/Kg) entre todas as combinações e muito próximo ao mais baixo (14,79 g/Kg), indicando elevado aproveitamento e reduzida excreção deste, no substrato. Tecnicamente, os teores de EE nas pastagens (dieta NL) são menores em relação aos teores fornecidos pela dieta L (maior proporção de concentrados). Um dos fatores que justificam a maior excreção de EE e EE_{orig.} nas fezes originadas da dieta NL pode ter sido decorrente do fato das vacas não lactantes apresentarem um requerimento deste parâmetro bem inferior às vacas lactantes. Assim, devido

à baixa necessidade, houve menor aproveitamento e maior excreção. O alto EE registrado também pode ser decorrente de outros compostos que não são lipídeos mais comuns, como ceras, ácidos graxos livres e esteróis, os quais incrementaram o EE das fezes.

Complementarmente, os substratos originados desta combinação NL/primavera apresentaram o menor teor de fibras pouco biodegradáveis (dieta NL), a citar, FBO_{orig}. (2,8 g/Kg), dentre todas demais combinações, fato que não desfavoreceu a produção de biogás.

Aparentemente, este fato também sinaliza uma incoerência, haja visto que a dieta NL se caracteriza pelo pastejo direto sobre a braquiária, a qual possui elevados teores de compostos fibrosos (pouco biodegradáveis). Entretanto, na primavera, a presença de fibras de melhor digestibilidade (celulose amorfa, hemicelulose e componentes mais solúveis da parede celular) estão presente em maiores proporções em relação às fibras menos digestíveis (lignina, sílica associada às paredes celulares, e celulose cristalina estruturada). Considerando que a degradação ruminal (digestão e fermentação) desta dieta é lenta devido ao efeito de enchimento do rúmen (limitação física) e a taxa de passagem é reduzida, podemos esperar melhor degradação desses compostos e menores teores de FBO_{orig}. (originadas da dieta NL) excretados.

Embora esse substrato tenha apresentado um elevado EE e EE_{orig}., fato que colaborou com a terceira maior VAB, ainda assim o valor de SV foi baixo (8,86%), sugerindo elevada conversão dos demais compostos biometanizáveis desta dieta e menor excreção dos mesmos no substrato. A dieta NL apresenta menor digestibilidade, passagem mais lentada digesta pelo TGI, degradação mais lenta, redução de consumo e menor excreção. A redução de consumo voluntário induzida pela lenta taxa de passagem da digesta, é elucidada por (Detman, 2023), ao explicar que um novo fluxo (input) de alimento somente é ingerido após a digestão e liberação da digesta originada da alimentação anterior presente no rúmen, sendo este um processo contínuo. Complementarmente, o elevado consumo de água na primavera, que apresentou T^oC médias altas (El Niño) podem ter reduzido o SV, visto que, na dieta NL as vacas estão mais vulneráveis às altas T^oC, já que pastejam diretamente na forragem sem opções de sombreamento. As elevadas T^oC médias na primavera de 2023 colaboraram com a redução do SV desta combinação. Segundo Starling *et al.* (2002), aumento da demanda hídrica pode ser duas vezes maior que o comum em animais que apresentem em estado de estresse térmico constante.

Em síntese, embora o SV nas fezes resultante desta combinação (NL/primavera) fosse baixo, a presença nestes substratos de altos teores de EE, baixos teores de fibras indesejáveis (foram lentamente digeridas), resultaram em um substrato com bom potencial de produção de biogás.

A combinação e NL/inverno, registrou o menor VAB (860 ml) dentre todas as demais combinações, sendo também o menor dentro das dietas NL, embora o SV correspondente (12,12%) seja o maior dentro destas e o terceiro maior SV dentre as demais combinações.

O inverno nesta região do Brasil é caracterizado por baixas T°C e baixas precipitações e, neste cenário, as forragens se encontram nutricionalmente comprometidas em termos qualitativos e quantitativos, apresentando altos teores de compostos fibrosos de baixa degradabilidade (ex.lignina, sílica associada às paredes celulares, e celulose cristalina estruturada). Tal fato reduz ainda mais a densidade energética e nutricional desta dieta, resultando na excreção de fezes (substratos) menos favorecidas nutricionalmente.

De acordo com os resultados das análises bromatológicas, para esse substrato foi registrado a segunda menor PBOrig. (1,4 %), o menor valor de N (13,1 g/Kg). Esses parâmetros contribuíram para o menor VAB registrado neste trabalho. No contexto do N, Gueri, Souza e Kuczman, (2017), citando Sgorlon *et al.* (2011), apresentam que, em condições de baixos teores de nitrogênio (elevada relação C/N), os microrganismos não conseguem metabolizar o carbono presente, o que leva a uma ineficiência do processo.

O EEOrig. (0,4 g/Kg), foi o valor mais alto registrado dentre os demais, embora muito próximo ao segundo maior (0,3 g/Kg). Este importante parâmetro colaborou com o maior teor de SV (12,12%) dos substratos originados dentro das dietas NL ou o terceiro maior SV dentre as demais combinações. Sua elevada excreção tem origem na reduzida digestibilidade desta dieta, a qual induz ao menor consumo por enchimento do rúmen (espaço físico limitado) e limita, também, sua capacidade de aporte energético ao processo de degradação ruminal (digestão e fermentação), culminando na ineficiência do processo digestivo global e baixo aproveitamento da fração orgânica (SV) dietética, elevando o valor do SV excretado (neste caso, o EE foi o constituinte que elevou o SV), mesmo tendo havido redução de consumo. Solórzano (2012) relatou alta correlação entre o consumo de matéria seca e o teor de fibra em detergente neutro (FDN) da forragem e de dietas com menos de 65% de concentrado ou mais de 32% de FDN, sendo o consumo definido pelo efeito de enchimento. Forbes (1993) concluiu que os ruminantes em geral são capazes de controlar seu consumo energético de maneira semelhante aos animais de estômago simples, desde que a densidade de nutrientes da dieta seja suficientemente alta para que as características físicas não interfiram.

Teoricamente, esses elevados EE em conjunto com o terceiro menor teor de P (4,85 g/Kg), o quarto menor POrig. (0,8 g/Kg), o terceiro maior Ca (9,39g/Kg) e segundo maior CaOrig.(1,6g/Kg), o segundo maior MgOrig.(0,6 g/Kg), poderiam favorecer as produções, pois são valores medianos. Os baixos teores de fibras indesejáveis (NL), sendo elas, segunda menor

FB (228 g/Kg), terceira menor FBOrig. (3,8 g/Kg), também poderiam colaborar. Entretanto, outros fatores que serão adiante apresentados, influenciaram negativamente as VAB.

O terceiro maior MM (177,5 g/Kg), mas muito próximo ao segundo maior (189,5 g/Kg) e o maior MM Orig. (3 g/Kg), indicam altos teores de sólidos fixos (SF) ou compostos inorgânicos, sinalizando maior estabilidade desse substrato, fato que torna esse substrato potencialmente menos apto para altas produções de biogás. Estes elevados valores de MM e MMOrg. são constituídos pelas já comentadas excreções medianas a altas de P, Ca e Mg no substrato decorrente também da comentada ineficiência ruminal.

A redução de consumo voluntário decorrente da qualidade precária das forragens é um fator complementar de relevância que contribuiu para o baixo potencial desse substrato em produzir biogás. Um estímulo ao maior consumo para gerar maior incremento calórico devido as baixas T°C afim de manter a homeotermia, poderia resultar em maiores excreções de nutrientes, mas os altos teores de compostos fibrosos pouco degradáveis das forragens não favoreceu este consumo. No substrato, os teores de FBOrig. (3,8 g/Kg), terceiro menor valor excretado, representa que, embora tenha havido redução de consumo, os elevados teores originais de fibras na dieta NL foram relativamente bem digeridos em função da passagem mais lenta da digesta pelo TGI. Assim, isoladamente, este fato não contribuiu para o baixo VAB.

As interações entre menor consumo com composição inicial nutricional inicial baixa ofertada pela forragem, o menor teor de PB (84 g/Kg) entre todas e o segundo menor PBOrg. (1,4 %), o menor valor de N (13,1 g/Kg) e a comprovada estabilidade desse substrato foram as responsáveis por estes resultados.

Ainda na estação do inverno, foi registrada a maior diferença de VAB entre dieta L e NL (VAB L 56,97 % superior à NL). A diferença de SV das fezes originadas da dieta L (13,35%) e NL (12,12 %) foi de 10,1 %. A princípio, é pouca diferença de SV para justificar esta acentuada diferença de produção. Esta acentuada diferença de VAB entre L e NL dentro do inverno pode ser justificada, analisando os resultados bromatológicos, pela maior excreção de PBOrg. (1,9%) das dietas L, em comparação à baixa excreção de PBOrg. (1,4%) das dietas NL e P e POrig. (7,09 e 1,1 g/Kg) das dietas L, em comparação com o P e POrig. (4,85 e 0,8 g/Kg) das dietas NL. Em complemento, a combinação L/inverno apresentou FB (379 g/Kg) e FBOrg. (6 g/Kg), as maiores dentre as demais. Novamente, a melhor digestibilidade da fibra originada da dieta L (silagem), pode ter contribuído para essa diferença de VAB a favor da dieta L, no inverno.

Comparando os SV dentro das dietas L, podemos observar os menores valores (11,19% e 10,02%), coletadas no verão (2023) e outono de 2024, respectivamente. As estações citadas

em seus respectivos anos, apresentaram T°C médias superiores influenciadas pelo fenômeno El Niño. Tal fato induziu ao maior consumo de água nessas duas estações. O elevado consumo de água no verão somado ao alto teor de PB da dieta L, que também estimula o consumo de água por elevar o metabolismo digestivo, reduziram o SV nas fezes. Sarolli (2005), apresenta que o consumo de água é um dos fatores que influenciam consideravelmente os ST dos estrumes e uma dieta com altos teores de PB incrementam este consumo, reduzindo os ST deste resíduo. Esta afirmação se aplica também ao SV, o qual representa uma fração dos ST, e que no nosso trabalho, também foi reduzido.

5.4.2 Relação dos parâmetros bromatológicos, SV, com as PEM

As PEM resultantes das fezes originadas das dietas L no verão, inverno e primavera, registraram valores superiores às originadas das dietas NL, assim como ocorreu para o VAB.

Em síntese, este comportamento de justifica pelas maiores excreções decorrente da elevada densidade energética e nutricional comuns da dieta L que incrementam os valores de SV (PBOrig., N, P, POrig.), somados à FB e FBOrig. das dietas L (possuidoras de boa degradabilidade), em relação à dieta NL. O detalhamento das discussões são os mesmos realizados para a VAB. Orrico Júnior, Amorim e Lucas Júnior (2010), comparando dietas com 60% e 40% de concentrado (C), registraram potenciais de produção de metano por kg de SV adicionado superiores em 17% para a dieta com 60% de concentrado, para TRH de 120 dias.

No outono foi registrada uma PEM 19% superior da dieta NL (145,13 ml NCH₄/g SV) em relação à dieta L (122,10 ml NCH₄/g SV), assim como aconteceu com o VAB, cuja diferença foi de 12,65 %. As justificativas para esta inversão de PEM (NL>L), são as mesmas discutidas para os VAB, a citar, maiores valores de SV (EE e EEOrig.), Ca e CaOrig., P e POrig. Mg e MgOrig. na dieta NL em relação à L. O teste de pareamento entre as estações de Mann-Whitney, foi aplicado, confirmando diferença estatisticamente significativa no outono, entre as dietas L e NL (p-value = 0.01482).

Entretanto, esta superioridade de 19% da PEM (NL> L) no outono, é bem mais expressiva em comparação da diferença de 12,65 % entre as VAB (NL>L), mesmo que as fezes oriundas da dieta L/outono tenham apresentado valores acentuadamente superiores para os parâmetros de PBOrig (2,3%), segunda maior dentre as demais, em relação à NL, fato que favoreceria a maior PEM da dieta L em relação à NL, o que não aconteceu, sugerindo a possibilidade da ocorrência de processos inibitórios nos ensaios de PBM na combinação

L/outono, neste caso, excesso de amônia (NH₃) originado desta segunda maior PBO_{Orig.} (2,3%), reduzindo a PEM em maiores proporções em relação à redução de VAB.

Outros parâmetros bromatológicos podem justificar a maior PEM da combinação NL/outono em relação à L/outono, conforme já discutidos no sub tópico 5.4.1. Resumidamente, a combinação NL/outono pode produzir excesso de acetato, induzindo à ineficiência ruminal, registrando SV (11,48%) superior à dieta L (10,02%), respaldado pelos maiores valores EE no substrato NL superiores em 102,36% em relação ao L e EE_{Orig.} 33,3% superiores, sendo este o principal influenciador da melhor PEM observada na combinação NL em relação à L, além do fósforo (P) e (P_{Orig.}), Cálcio (Ca) e (Ca_{Orig.}) e (Mg_{Orig.}) superiores na NL.

No outono, a PEM da dieta L, assim como as da NL foram as mais baixas em relação às demais. São também as mais baixas quando comparados dentro de cada grupo das dietas L e NL. Dentro do grupo L, no outono foi registrado o menor EE em comparação às demais amostras, fato que pode ter culminado em menor PEM desta, quando comparado com as demais. Porém o substrato originado da dieta NL é mais rico neste parâmetro em relação à dieta L, assim como em relação às demais, e, sendo assim, supostamente essa dieta NL não poderia ter apresentado tão baixas produções em relação às demais.

Os SV de ambas as dietas não são os mais baixos, 10,02 % para L e 11,48 % para NL (são médios em relação ao demais). acaso os SV fossem os mais baixos, essas baixas produções estariam parcialmente justificadas. Nos testes referentes à coleta do outono, utilizamos uma tampa de vedação diferentes dos demais ensaios nos frascos de borossilicato em substituição aos septos de butila, e verificamos vazamentos. Quando retornamos o uso dos septos de borracha, os vazamentos não mais ocorreram. Este evento pode ter reduzido as médias de produções de metano desses ensaios.

As maiores PEM registradas neste trabalho foram originadas das fezes coletadas no verão, originadas das dietas L e da NL (407,65 ml NCH₄/g SV e 388,89 ml NCH₄/g SV, respectivamente), A partir do teste (Kruskal-Wallis), no verão, houve diferença estatística entre dieta L e NL (p<0,05).

Os SV foram de 11,19 % para a dieta L e 9,47% para a dieta NL. O maior SV das fezes originadas da dieta L em relação ao SV da das fezes originadas da dieta NL justificaria a maior PEM da L em relação a NL. Entretanto, o SV da dieta L/verão (11,19%) é o segundo menor em comparação aos demais dentro desta dieta e mesmo assim resultou em maior PEM dentro desta e o maior entre todas as combinações (407,65 ml NCH₄/g SV). O SV da dieta NL também é o segundo menor em relação aos demais dentro da dieta NL e resultou em na maior PEM dentro desta dieta e na segunda maior dentre todas demais combinações (388,89 ml NCH₄/g SV).

Desta forma, pode-se inferir que o parâmetro SV, isoladamente, não justificou as maiores produções. Conforme descrevemos no subtópico 5.4.1, o alto consumo de água no verão reduziu o valor do SV nesses substratos.

Podemos explicar essas maiores PEM pela composição bromatológica dos substratos, da seguinte forma. Para a combinação L/verão, foram registrados PBOrig. (2,6%), representando o maior teor dentre todas as demais combinações, o maior N (17,9 g/Kg), o P (6,21 g/Kg) de valor médio/alto, o terceiro maior P Orig. (0,9 g/Kg), muito próximo ao maior valor de POrig. (1,2 g/Kg) dentre todas combinações, o segundo maior EEOrig. (0,3 g/Kg). Em conjunto, a interação desses parâmetros proporcionou a maior PEM (407,65 ml NCH4/g SV). O maior teor inicial desses nutrientes presente na dieta L, somado ao fato da dieta L ter alta digestibilidade, culminando, ao final de uma cadeia de eventos em elevada excreção de nutrientes, respalda esses resultados. Adicionalmente, um alto teor de proteína, comum nesta dieta (presença de farelo de soja), pode ter induzido à maior produção da amônia ruminal (NH₃), também inibitória do processo (ainda a nível de rúmen). Desta forma, a interação desses dois eventos prejudicou a degradação ruminal acarretando o menor aproveitamento da dieta, que, somado ao maior consumo, resultou em excreções medianas, que mesmo assim, resultaram na maior PEM em função de outras interações, das quais falaremos adiante.

De acordo com Barker *et al.* (1995), Costa *et al.* (2008) apud Goularte (2011), quando a taxa de produção de AGCC excede a de remoção, ocorre o acúmulo dos mesmos no rúmen, podendo desencadear distúrbios metabólicos. A ingestão de alimentos rapidamente fermentáveis eleva a atividade microbiana, causando acentuadas variações nos produtos finais da fermentação (AGV e amônia) e redução do pH ruminal, alterando o aproveitamento dos demais nutrientes da dieta. Problemas metabólicos podem estar relacionados ao excesso de concentrado ministrado a animais de alta produção e tem sido relacionada com a possível diminuição nas proporções de butirato e acetato ruminal (predominância de propionato).

A segunda maior FBOrig. (5,1 g/Kg) foram registrada na combinação L/verão. Embora a dieta L contenha menor proporção de fibras em relação à NL, ela ainda possui 40 % de volumoso (silagem de milho). Sua maior excreção reforça a hipótese sugerida de ineficiência degradativa ruminal. Entretanto, conforme anteriormente comentamos, se esta fibra originada da silagem (dieta L) tem melhor digestibilidade, esse alto valor no substrato, quando submetidos aos ensaios de PBM, colaborou com as PEM.

Nesta combinação L/verão, não podemos nos apoiar em alterações de consumo induzidos por estresses térmicos, pois no sistema Compost Barn, as vacas estão sob ventilação.

Em relação à combinação NL/verão, foram registrados o maior P (7,34 g/Kg), o quarto maior POrig. (0,9), porém este, bem próximo ao maior POrig. dentre todos (1,2 g/Kg) em conjunto com o maior EE (18 g/Kg), o segundo maior EEOri. (0,3 g/Kg), os maiores teores Ca e CaOrig. (10,28 e 1,3 g/Kg, respectivamente), o segundo maior MgOrig. (0,6 g/Kg). Esses foram os parâmetros diferenciais que proporcionaram a segunda maior PEM (388,89 ml NCH₄/g SV) neste trabalho. A segunda menor FBOri. (3,1 g/Kg), por representar um valor baixo de uma fibra indesejável (fibras originadas da dieta NL, forragens) pode ter sido importantes. Em complemento, podemos considerar que o consumo foi favorecido, haja visto que nesse período as forragens se encontram com ótimos níveis nutricionais e alta palatabilidade, decorrente do regime regular de precipitação e alta T°C. Orrico Junior, Amorim e Lucas Júnior (2011) comentam que, quando os animais pastejam em forragens densas e com porte adequado, o consumo pode ser otimizado.

A combinação e NL/inverno, registrou o terceiro menor PEM (184,6 mlNCH₄/g SVT), ficando acima, apenas das combinações no outono. Esta combinação registrou também o menor VAB (860 ml). Este comportamento comprova ineficiência na DA (testes de PBM) para esta combinação. As discussões acerca dos resultados desta combinação são as mesmas das realizadas para o VAB no sub tópico 5.4.1.

Na primavera, a PEM registrada das fezes originadas da dieta L (219,40 ml NCH₄/g SV) e NL (208,56 ml NCH₄/g SV), representam valores intermediários, quando comparados aos demais. O teste Kruskal-Wallis demonstrou que na estação da primavera, para o PEM, não houve diferença significativa entre as dietas L e NL (p-value = 0.5902).

Quando comparamos verão e inverno, que são as estações que comumente apresentam condições climáticas opostas. Podemos observar que no verão, para dietas L, foram registrados PEM superiores em 86,67% em relação ao inverno (407,65 ml NCH₄/g SV no verão e 218,38 ml NCH₄/g SV no inverno), e para dietas NL no verão, PEM superiores em 110,6 % em relação ao inverno (388,89 ml NCH₄/g SV no verão e 184,60 ml NCH₄/g SV no inverno). Ou seja, as fezes originadas tanto das dietas L, como das NL produziram mais PEM no verão. Esta afirmação pode ser justificada pela maior necessidade de termorregulação no inverno, ou seja, os ruminantes necessitam de mais energia para manter a T°C corporal dentro da zona de conforto térmico (homeotermia) e, para tanto, precisam metabolizar mais nutrientes da dieta. Em consequência, menos compostos biometanizáveis, os quais favoreceriam a DA e a formação de biogás, serão excretados nas fezes durante o inverno.

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS

Os testes estatísticos foram aplicados somente para avaliar as produções específicas de metano (PEM) e sua relação com as dietas e estações climáticas.

O teste de Shapiro Wilk, verificou a normalidade dos dados de PEM resultantes da dos ensaios de PBM das fezes originadas das dietas ministradas às vacas lactantes (L) e não lactantes (NL) coletadas nas estações climáticas do outono, inverno, primavera e verão. Os resultados permitiram afirmar que os dados analisados não atendem aos critérios de uma distribuição normal, considerando um intervalo de confiança de 5% ($\alpha=0,05$).

Desta forma, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, foi utilizado a fim de comparar os conjuntos de dados e verificar se houve ou não diferenças estatísticas significativas entre dieta L e NL, sendo possível verificar que a distribuição dos dados dos grupos dos ensaios das amostras em L e NL, foram significativamente diferentes, já que o resultado de p foi menor de 5% ($p < 0,05$), indicando que as coletas diferem entre si.

A partir do mesmo teste (Kruskal-Wallis), foi possível verificar se houve diferenças estatísticas entre as estações do ano e as dietas. No outono e primavera, não houve diferença estatística entre dieta L e NL. No inverno e verão, houve diferença estatística entre dieta L e NL.

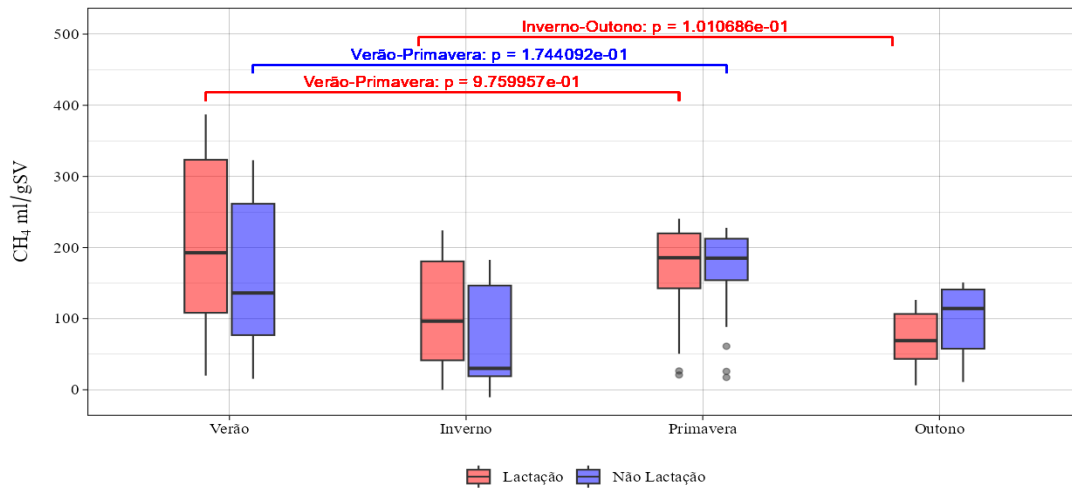
O Dunn test foi utilizado para comparar pares de grupos e especificar quais os grupos que apresentam diferenças estatísticas significantes. Foram comparados outono com inverno, inverno com primavera, outono com verão, inverno com verão, primavera com verão. Não ficaram comprovadas diferenças estatísticas quando outono com primavera foram comparadas. Em síntese, podemos afirmar, de acordo com o Dunn Text, que em todas as comparações entre os grupos existem diferenças significativas, com exceção da comparação entre os grupos outono com primavera, para $p > 0,05$.

O teste de pareamento entre as estações de Mann-Whitney, foi aplicado para comparar as diferenças entre as estações climáticas porque é mais indicado considerando existir apenas dois grupos, lactação e não lactação, demonstrando não haver diferença estatística no geral ($p\text{-value} = 0.227$), com exceção no outono, entre as dietas L e NL ($p\text{-value} = 0.01482$).

5.5.1 Produções específicas de metano (PEM)

A Figura 6, representa as PEM entre as dietas L e NL coletadas nas 4 estações do ano, apresentadas em um Boxplot.

Figura 6 - Boxplot representando as PEM entre as dietas lactante (L) e não lactante (NL), coletadas no verão, inverno, primavera, outono



Fonte: Autor (2024).

A aplicação do boxplot evidencia como diferentes estações climáticas e a variação da dieta podem influenciar PEM. As produções mais altas, sinalizadas pela linha mediana, foram registradas no verão para a dieta L e primavera para dietas L e NL e as mais baixas no outono para a dieta NL. Na estação da primavera podemos observar a ocorrência de outliers.

As medianas que mais se aproximaram entre as dietas L e NL ocorreram na primavera (3), indicando que a PEM nesta estação apresentou as menores diferenças entre dietas L e NL.

As medianas que mais se distanciaram entre dietas L e NL foram registradas no verão (1) e inverno (2) e outono (4), indicando maiores amplitudes de diferenças de PEM nessas estações.

Entres as estações, em ordem decrescente, as maiores caixas (ou IQRs) são as do verão, L e NL, inverno L e NL, primavera, L e NL e outono L e NL, indicando também uma ordem decrescente de variabilidades nas PEM. A maior variabilidade de produção foi no verão e a menor foi no outono. Assim, a estação que apresentou menor consistência na produção (maior variabilidade) foi o verão, e a que apresentou maior consistência (menor variabilidade) foi o outono. Dentro das estações L com NL, a maior variabilidade foi registrada no outono, indicando a menor consistência.

As posições dos “bigodes” sinalizam a assimetria dos dados entre as estações. A menos assimétrica é a do verão, quando comparada com as demais estações. Comparando as dietas L com NL dentro de cada estação, a menos assimétrica, também é o verão.

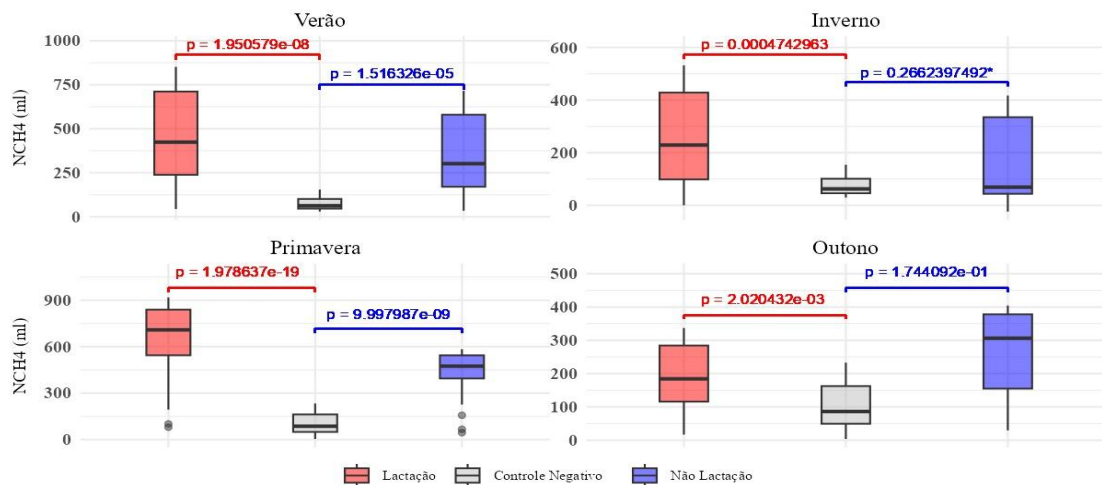
Em relação às significâncias das diferenças, podemos observar, pela mediana dos dados, que não há diferença entre a dieta L no verão e a dieta L na primavera ($p=9,759957 \times 10^{-1}$ - Dunn Test), entre a dieta NL no verão e a dieta NL na primavera ($p=1,744092 \times 10^{-1}$ - Dunn Test) e L no inverno e L no outono ($p=1,010686 \times 10^{-1}$). Essas informações foram confirmadas pelo teste posteriori ao Kruskal-Wallis, o Dunn Text, no qual, para essas combinações citadas, apurou-se valores de p maiores que 5%. As demais combinações tiveram p menor que 5%.

Essas observações podem ajudar a entender melhor os padrões de produção e a planejar ações específicas para cada estação.

5.5.2 Boxplot comparando as PEM alcançadas em cada estação com o controle negativo

A figura 7 nos apresenta que, em todas as estações, ambas as dietas mostraram diferença estatística significativa em relação ao controle negativo (inóculo), exceto a combinação NL/inverno, comprovando que o substrato utilizado foi diferencial na produção de metano.

Figura 7 - Boxplot comparando a PEM, as estações climáticas e o controle negativo



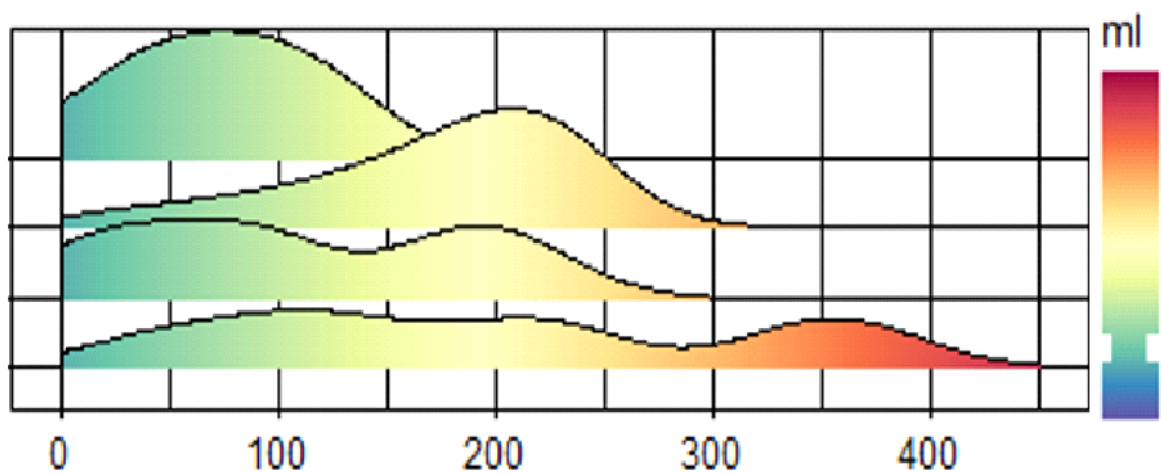
Fonte: Autor (2024).

Essas observações podem ajudar a entender melhor os padrões de produção e a planejar ações específicas para cada estação.

5.5.3 Densidade dos dados ao longo das coletas

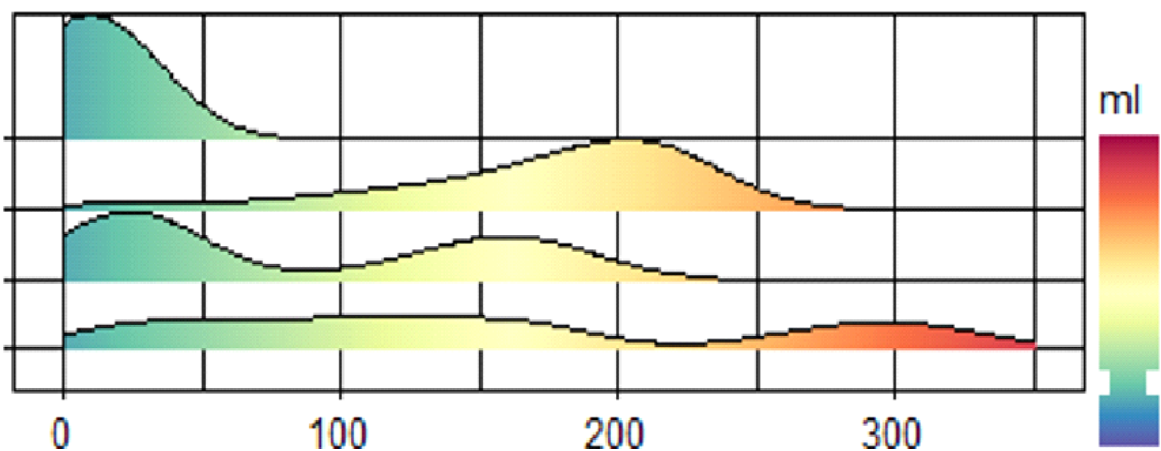
As Figuras 8 e 9, representam a densidade dos dados das dietas lactação e não lactação, variando as estações do ano, elucidando que os dados desta pesquisa não seguem uma distribuição normal.

Figura 8 - Representação da densidade dos dados das dietas lactante coletadas nas quatro estações climáticas



Fonte: Autor (2024).

Figura 9 - Representação da densidade dos dados da dieta não lactante coletadas nas quatro estações climáticas



Fonte: Autor (2024).

5.5.4 Sólidos Voláteis (SV) / Sólidos Totais (ST) e relação com a produção específica de metano (P.E.M.)

Os valores para a relação SV/ST nos substratos analisados variaram de 57% (NL/primavera) e 84% (L/primavera). As relações entre SV/ST nas fezes podem sinalizar a eficiência da DA. Quanto menor a relação, ou seja, quanto maiores os ST ou menores os SV, maior a estabilidade do estrume, menor é a eficiência do processo e menores PEM seriam esperadas. Neste trabalho, a menor relação ocorreu na combinação NL/primavera (SV/ST 57,91%) que produziu 208,56 (ml NCH₄/g SVT), representando a quarta menor PEM. Pelo mesmo raciocínio, a combinação da dieta L/primavera (SV/ST 84%), produziria os maiores PEM. Essa combinação produziu (219,4 ml NCH₄/g SVT), correspondendo à terceira maior produção. Embora possamos admitir alguma influência desta relação na PEM, a interação dos demais fatores, abrangendo os dietéticos e climáticos, em conjunto, definiram as produções.

Ao considerarmos a influência climática sobre as produções de biogás e de metano, é imprescindível esclarecer que, neste trabalho, esta ocorrerá “a campo”, alterando o comportamento dos ruminantes em busca da conservação da homeotermia, sobretudo o comportamento ingestivo, influenciando a digestibilidade das dietas, a eficiência do processo digestivo e fermentativo ruminal, e conseqüentemente a composição química das fezes, a qual influenciará na performance desses substratos quando submetidos à DA, visto que as condições de T°C de laboratório foram controladas, ou seja, a partir do momento que esses substratos foram para o laboratório, não poderemos considerar influência das estações climáticas sobre os mesmos.

5.6 CINÉTICA: MODELO MODIFICADO DE GOMPERTZ

O modelo de Gompertz é uma equação diferencial que descreve o crescimento exponencial limitado de uma população ou sistema. Este modelo tem sido utilizado para avaliar dados de pesquisas de contexto biológico na biologia e é adequado para entender a dinâmica populacional microbiana de diversas espécies, bem como para prever o crescimento em diferentes cenários.

Assim, utilizamos este modelo para determinação dos parâmetros cinéticos observados em relação à produção específica de metano e quando aplicado à digestão anaeróbia, auxilia a interpretar a velocidade de crescimento da produção de metano (Tabela 20).

Tabela 20 - Parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz e produção específica de metano

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
CH ₄ máx (Nml CH ₄ g/SV d)	407,65	388,89	122,1	145,13	218,38	186,86	219,4	208,56
Velocidade máxima (μm)	9,270	6,594	1,745	3,050	3,737	2,53	11,229	13,296
Fase Lag (λ)	0	0	0	0	1,204	14,05	0	0
R ²	0,986	0,980	0,980	0,993	0,977	0,9705	0,968	0,958

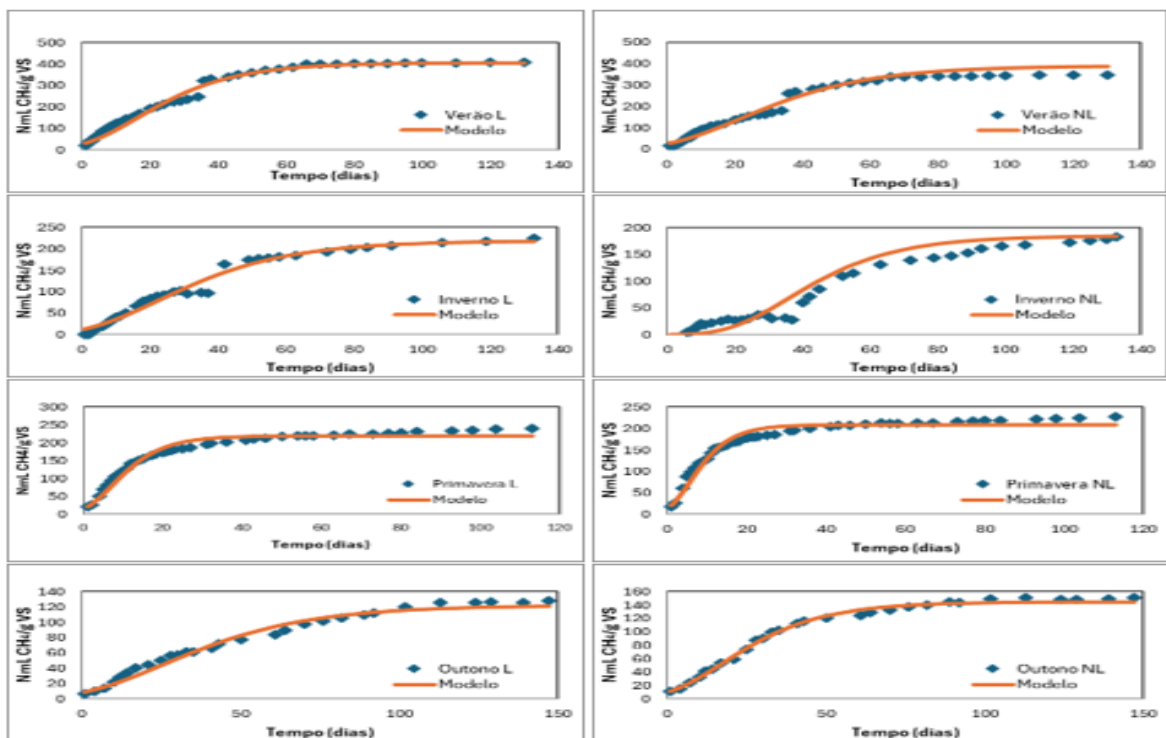
Fonte: Autor (2024).

As combinações L e NL na primavera apresentaram as maiores taxas de produções máximas de metano (11,229 e 13,296 μm), respectivamente, seguidas pela taxas alcançadas pelas combinações L e NL no verão (9,270 e 6,594 μm). Os ensaios de L e NL/inverno e L e NL/outono apresentaram valores aproximados de velocidade máxima, com exceção da combinação L/outono, a qual apresentou a menor velocidade máxima (1,745 μm).

Nas combinações L/inverno e NL/inverno podemos observar uma fase lag de aproximadamente 1 dia e 14 dias, respectivamente.

Os valores de R², obtidos a partir da modelagem cinética, foram acima de 95%, indicando que os dados deste trabalho se ajustaram ao modelo de Gompertz (figura 10).

Figura 10 - Comportamento dos ensaios de PBM das dietas L e NL de acordo com as estações do ano em comparação ao modelo cinético de Gompertz



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

O potencial bioquímico de metano (PBM) dos substratos analisados foram influenciados pelas variações das dietas ministradas às vacas lactantes e não lactantes, assim como pelas estações climáticas nas quais foram coletados.

As variações na composição das dietas, sobretudo sua densidade energética e nutricional, influenciaram sua digestibilidade, o consumo voluntário pelos ruminantes, a eficiência degradativa ruminal, o aproveitamento dietético e sua excreção, alterando a composição físico/química das fezes excretadas e o seu potencial para produção de biogás e metano.

As variações climáticas estacionais provocam alterações comportamentais nos ruminantes, sobretudo o comportamento ingestivo, alterando o consumo voluntário com a finalidade de conservar a homeotermia, influenciando a composição físico/química das fezes excretadas e o seu potencial para produção de biogás e metano.

As interações entre as variações na composição dos substratos, em conjunto com as variações climáticas estacionais, podem justificar os resultados de produções de biogás e metano, com mais precisão. A análise de fatores e parâmetros individualmente não fundamentam os resultados de forma segura.

Os maiores valores acumulados de biogás (2585 ml), foram registrados das fezes originadas da dieta ministrada às vacas lactantes (L), coletadas na primavera (L/primavera).

Os menores valores acumulados de biogás (860 ml), foram registrados das fezes originadas da dieta ministradas às vacas não lactantes (NL), coletadas no inverno (NL/inverno).

O maior valor de produção específica de metano (407,65 ml NCH₄/g SVT) foi registrado das fezes originadas da dieta ministrada às vacas lactantes (L), coletadas no verão (L/verão).

O menor valor de produção específica de metano (122,1 ml NCH₄/g SVT) foi registrado das fezes originadas da dieta ministrada às vacas lactantes (L), coletadas no outono (L/outono).

Maiores produções acumuladas de biogás e maiores produções específicas de metano são esperadas das fezes (substratos) originadas das dietas mais favorecidas em alimentos concentrados, decorrente, principalmente, da sua maior densidade energética e nutricional, por proporcionar incrementos nos valores de sólidos voláteis biometanizáveis nesses substratos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação dos parâmetros que influenciam as produções de biogás e metano a partir do aproveitamento dos resíduos originados da pecuária é primordial no sentido de alcançarmos maiores eficiências dos processos envolvidos objetivando a comprovação da sua viabilidade econômica, social e ambiental. Assim, uma relação de confiança com os pecuaristas pode ser estabelecida, tornando factível a aplicação maciça dessas tecnologias a campo.

Desta forma, é imprescindível o respaldo da pesquisa científica. Quanto mais parâmetros, combinações entre resíduos (codigestão), interações com as condições ambientais específicas forem testados, mais robustos e confiáveis serão os resultados.

Neste sentido, este trabalho pôde reunir informações regionalizadas sobre fatores relevantes que influenciam o processo de produção de energia limpa e renovável a partir do aproveitamento dos dejetos bovinos locais, sob as condições climáticas peculiares.

A diversidade de resíduos que surgem decorrentes das variadas atividades agropecuárias, em conjunto com a real presença das variações climáticas, são desafios que devem ser superados. Assim, a produção científica deverá continuar fornecendo subsídios para solucionar demandas advindas da sociedade, justificando seu mais nobre propósito.

REFERÊNCIAS

ALBANEZ, R. *et al.* Anaerobic biological treatment of vinasse for environmental compliance and methane production. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, [s.l.], v. 178, n. 1, p. 21-43, 23 set. 2015. Disponível em: <https://cdn.ncbi.nlm.nih.gov/corehtml/query/egifs/http://production.springer.de-OnlineResources-Logos-springerlink.gif>. Acesso em: 28 mar. 2024.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 24 ed. Washington, D.C.: American Public Health Associate, 2012. Disponível em:

<https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1982598>

Acesso em: 28 mar. 2024.

AMON, Thomas *et al.* Biogas production from maize and dairy cattle manure-influence of biomass composition on the methane yield. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.] v. 118, n. 1-4, p. 173-182, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.007>. Acesso em: 04 mar. 2024.

ANTUNES, M. Z. **Viabilidade da produção de biogás a partir de dejetos Animais**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Maria. Cachoeira do Sul, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/19191>. Acesso em: 27 out. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES (ABIEC). **Beefpoint**, [s.l.], versão PT-BR, agosto de 2024. Disponível em:

https://www.abiec.com.br/wp-content/uploads/beefreport_v2024-qualidademedia_v2.pdf.

Acesso em: 02 out.2024.

AZEVÊDO, A. M. M. R.; ALVES, A. A. **Bioclimatologia aplicada à produção de bovinos leiteiros nos trópicos**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009. 83 p. Comunicado Técnico, 188. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/664507>

Acesso em: 26 out. 2024

BEAUCHEMIN, K.A., UNGERFELD, E.M., ECKARD, R.J., WANG, M., 2020. Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation. **Animal**, [s.l.], vol.14, s2–s16. Disponível em:

<https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>. Acesso em: 23 fev.2025.

BERGMAN, E. N. Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. **Physiological Reviews**, [s.l.], v. 70, n. 2, p. 567-590, 1 abr. 1990.

Disponível em: <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.2.567>. Acesso em: 09 out. 2024.

BLASCO, Lucia *et al.* Dynamics of microbial community in response to co-feedstock composition in anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 364, p. 128039, 2022.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422013724>.

Acesso em: 17 jan. 2024

BLIGH, J.; JOHNSON, K. G. (1973) Glossary of terms for thermal physiology. **Journal of Applied Physiology**, [s.l.], 35 (6), 941-961. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4765838/>. Acesso em 25 fev.2025.

BRASIL. Lei Nº 13.203 de 08 de dezembro de 2015. Dispõe sobre a repactuação do risco hidrológico de geração de energia elétrica. **Diário Oficial da União**, [s.l.]. Disponível em <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=13203&ano=2015&ato=0feMTSE9UNVpWT430>. Acesso em: 04 abr. 2024

BRASIL. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – **MAPA**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/valor-da-producaoagropecuaria-de-2021-atenge-r-1-129-trilha>. Acesso em: 12 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 5.ed. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/livro_digital_5ed_estimativas_anuais.pdf. Acesso em: 12 jan. 2024.

CARDOSO, E.S. *et al.* Reguladores de consumo de bovinos em pastagem: recentes avanços. **Revista Nutritime**, [s.l.], vol. 11, nº 5, p. 3672-3682, 2014. Disponível em: <https://nutritime.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Artigo-271.pdf>. Acesso em 25 jan.2025.

CARVALHO, F. A. N. Nutrição de bovinos a pasto. Belo Horizonte: **Papel Form Editora Ltda.** Belo Horizonte, 2003. 428 p. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Nutri%C3%A7%C3%A3o_de_bovinos_a_pasto.html?id=KGIrHAAACAAJ. Acesso em 22 fev. 2024

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA). **Boletim do Leite**. Departamento de Economia, Administração e Sociologia. ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. USP - Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP . Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/leite-cepea-apesar-de-nova-alta-em-dezembro-preco-medio-de-2023-cai-14.aspx>. Acesso em: 12 jan. 2025.

CHERNICHARO, C. A. de L. *et al.* **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v. 5, p. 379, 2007. Disponível em: <https://www.scienceopen.com/document?vid=a8def414-e140-4a99-b76e-d201a24cff66> Acesso em: 22 jan. 2024.

COLDEBELLA, Anderson. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2006. Disponível em: <http://tede.unioeste.br:8080/tede/handle/tede/2841>. Acesso em: 27 mar. 2024.

COSTA, Mônica Sarolli Silva de Mendonça. **Caracterização dos dejetos de novilhos superprecoces: reciclagem energética e de nutrientes**. 2005. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu, 2005. Disponível em: <https://acervo.ead.unesp.br/handle/11449/96604>. Acesso em: 21 out. 2024.

DALTRO, Darlene dos Santos. **Uso da termografia infravermelha para avaliar a tolerância ao calor em bovinos de leite submetidos ao estresse térmico**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/95988>. Acesso em: 25 out. 2024

DA SILVA, Flávio Daniel Gomes. **Variações anátomo-fisiológicas face à climatização sazonal: estudo em vacas leiteiras com diferente potencial leiteiro**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Zootécnica) -Universidade de Évora. Évora, 2015. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/18742>
Acesso em: 26 out. 2024

DEMIRCI, G. G.; DEMIRER, G.N. Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 93, n. 2, p. 109-117, jun. 2004. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.019>. Acesso em: 02 nov. 2024.

DETMAN, E. **Entendendo as Vaquinhas: Uma abordagem informal sobre o complexo mundo da nutrição de animais ruminantes**. Livro. Viçosa: **Suprema Gráfica e Editora UFV**,2023. Disponível em: <https://www.editoraufv.com.br/produto/entendendo-as-vaquinhas-uma-abordagem-informal-sobre-o-complexo-mundo-da-nutricao-de-animais>. Acesso: Livro adquirido.

DEUTSCHER. VDI 4630 - Fermentation of organic materials characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. **Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure**, [s.l.], 2006. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=1932350>

DI PIETRO, Anderson; CORSO, Leonardo. Manejo e alimentação de vacas no período seco/transição. **Milkpoint**, [s.l.], 2015. Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/empresas/novidades-parceiros/manejo-e-alimentacao-de-vacas-durante-o-periodo-secotransicao-97021/>. Acesso em 23 jan. 2024.

FERRARESE, Julia Carolina Bevervanso Borba. **Potencial de geração de energia a partir da digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos oriundos do abate de bovinos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.106.2021.tde-05042022-152928>. Acesso em: 03 abr. 2024

FERREIRA, Sergio F. *et al.* Fatores que afetam o consumo alimentar de bovinos **Arquivos de Pesquisa Animal**, v.2, n.1, p.9 - 19, 2013 – ESALQ/USP, Piracicaba, SP. Arquivos de Pesquisa Animal, v.2, n.1, p.9 - 19, 2013. Disponível em: <https://www2.ufrb.edu.br/apa/component/phocadownload/category/13-ano-13-vol2?download=162:fatores-que-afetam-o-consumo-alimentar-de-bovinos>. Acesso em 25 fev. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020**. Rome, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb1329en>. Acesso em: 04 abr. 2024.FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **World Food and Agriculture -**

Statistical Yearbook 2022. Rome, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc2211en>. Acesso em: 04 abr. 2024.

FORBES, J. M. Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. In: FORBES, J. M., FRANCE, J. (Eds.). Voluntary feed intake. Cambridge: **University Press**. p.479-494,1993. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.1079/9780851998145.0000>. Acesso em: 12 mar. 2025.

GALBIATTI, J.A. *et al.* Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.432-437, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xYwqQcNLwQr6yZ4kTFk5sxs/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GERBER, Mandy; SPAN, Roland. **An analysis of available mathematical models for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas**. Proc. IGRC, Paris, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283518957_An_analysis_of_available_mathematical_models_for_anaerobic_digestion_of_organic_substances_for_production_of_biogas. Acesso em 25 fev. 2025.

GOULARTE, S.R. Comportamento ingestivo e digestibilidade de nutrientes em vacas submetidas a diferentes níveis de concentrado. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, [s.l.], v.63, n.2, p.414-422, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/sNLNFRbcMfvd9tZVnntyYnh/>. Acesso: 18 out. 2024.

GUERI, Matheus Diniz; SOUZA, Samuel Nelson Melegari; KUCZMAN, Osvaldo. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. **BIOFIX Scientific Journal**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 17-25, 2017. Disponível em <https://core.ac.uk/download/pdf/328079571.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2024.

HARDOIM, Paulo Cesar; GONÇALVES, Adriano Dicesar M. A. Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite. In: **Encontro de energia no meio rural**, 3., 2000, Campinas. **Proceedings online** [...] Campinas, 2000. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=msc0000000022000000100053&script=sci_arttext. Acesso em: 04 abr. 2024.

HOFFMANN, Rubia Godoy. **Estudo dos efeitos da temperatura e diluição dos dejetos suínos na geração de biogás**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal da Fronteira Sul. Cerro Largo, 2019. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/3111>. Acesso em: 27 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Pecuária Municipal**. Brasília: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>. Acesso em: 04 abr. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2001). **Climate Change 2001: Synthesis Report**, [s.l.], IPCC. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_TAR_full_report.pdf. Acesso em: 04 abr. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. GENEVA: IPCC, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf. Acesso em: 04 abr. 2024

JOHNSON, K. A. e JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, [s.l.], v. 73, Issue 8, August 1995, Pages 2483–2492, J. Disponível em: <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x> (1995). Acesso em: 22 fev. 2025.

KOZLOSKI G.V. **Bioquímica dos Ruminantes**. Livro. Santa Maria. Editora UFSM, 2017. 3ª edição revista e ampliada. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=tPYnDwAAQBAJ&sitesec=buy&hl=pt-BR&source=gbs_vpt_read. Acesso em: 11 jun. 2025.

KREUZER, M.; HINDRISCHESEN, I. K. Methane mitigation in ruminants by dietary means. The role of their methane emission from manure. **International Congress Series** [...]. Amsterdam, v. 1293, p. 199-206, 2006. Disponível em: <https://researchprofiles.ku.dk/en/publications/methane-mitigation-in-ruminants-by-dietary-means-the-role-of-thei>. Acesso em: 27 mar. 2024.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1141618>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LETTINGA, G. Sustainable integrated biological wastewater treatment. **Water Science and Technology**, Kidlington, v.33, n.3, p.85-98, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0273122396003034>. Acesso em: 04 mar. 2025.

MADINGAN T. M.; MARTINKO M. J.; BENDER S. K.; STAHL A. Brock biology of microorganism. Porto Alegre: **Artmed Editora Ltda, 2016**. Disponível em: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292235196_A31976983/preview-9781292235196_A31976983.pdf. Acesso em 25 fev. 2025.

MENDONÇA, Henrique Vieira de; OTENIO, Marcelo Henrique; PAULA, Vanessa Romario de. Digestão anaeróbia para produção de energia renovável. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 1-16, 28 jun. 2021. Centro Universitario de Maringá. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n3e7667>. Acesso em: 31 mar. 2024.

MERTENS, D. R. Regulation of forage intake. In: FAHEY JR., G.C. (Ed.) Forage quality, evaluation and utilization. **Madison: American Society of Agronomy**, [s.l.] 1994. p.450-493. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/1994.foragequality.c11>. Acesso em : 24 mar. 2025.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P.; TCHOBANOGLIOUS, Georg. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. New York: McGraw-Hill, 1991.

Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1452754>

Acesso em: 13 jan. 2024

MIRANDA, Adélia Pereira; AMARAL, Luiz Augusto do; LUCAS JUNIOR, Jorge de.

Influência da temperatura na biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos e suínos.

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, SP, 2006. **Anais [...]**.

Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2006/epg/01/EPG00000338_ok.pdf

Acesso em: 28 fev. 2024.

MOLLER, H.B.; SOMMER, S.G.; AHRING, B.K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. **Biomass Bioenergy**, Oxford, v.26, n.3, p.485-495, 2004.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953403001569>

Acesso em: 23 abr. 2025

MORAES, Bruna S.; ZAIAT, Marcelo; BONOMI, Antonio. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable energy reviews**, [s.l.], v. 44, p. 888-903, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>. Acesso em: 26 out. 2024

MORAES, L.M. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de dejetos oriundos de atividades zootécnicas**. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Água e Solo) - Faculdade de

Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. Disponível em:

<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=463665>. Acesso em: 01 mar. 2024

MORSE, D. *et al.* Effects of concentration of dietary phosphorus on amount and route of excretion. **Journal Dairy Science**, New York, v. 75, p. 3039-3049, 1992. Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1460134/>. Acesso em 25 fev. 2025

MOSS, Angela R.; JOUANY, Jean-Pierre; NEWBOLD, John. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. **EDP Sciences**, [s.l.], p. 231-253, 2000.

Disponível em: <https://hal.science/hal-00889894/document>. Acesso em: 07 mar. 2025.

MURRAY, R. M.; BRYANT, A. M.; LENG, R. A. Methane production in the rumen and lower gut of sheep given lucerne chaff: effect of level of intake. **British Journal of Nutrition**, [s.l.], v. 39, n. 2, p. 337-345, 1978. Disponível em:

https://www.cambridge.org/core/journals/british-journal-of-nutrition/article/methane-production-in-the-rumen-and-lower-gut-of-sheep-given-lucerne-chaff-effect-of-level-of-intake/F68A287BEA8D304CC38605469AB2CB70?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=copy_link&utm_source=bookmark

https://www.cambridge.org/core/journals/british-journal-of-nutrition/article/methane-production-in-the-rumen-and-lower-gut-of-sheep-given-lucerne-chaff-effect-of-level-of-intake/F68A287BEA8D304CC38605469AB2CB70?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=copy_link&utm_source=bookmark. Acesso em: 07 abr. 2025.

NANDI, Rajesh; SAHA, Chayan Kumer; SARKER, Shiplu; HUDA Md. Sanaul and ALAN Md. Monjurul. Optimization of reactor temperature for continuous anaerobic digestion of cow manure: Bangladesh perspective. **Sustentabilidade**, [s.l.], v. 12, n. 21, p.8772, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12218772>. Acesso em: 28 fev. 2024.

NEWBOLD, C. J. *et al.* Propionate precursors as possible alternative electron acceptors to methane in ruminal fermentation. In: TAKAHASHI, J.; YOUNG, B. A. (Eds.). **Greenhouse gases and animal agriculture**, Amsterdam: Elsevier, 2002. p. 151-154.

Disponível em: <https://abdn.elsevierpure.com/en/publications/propionate-precursors-as-possible-alternative-electron-acceptors->. Acesso em: 07 mar. 2025.

OLIVEIRA S.J.de M.; CARVALHO G.R.; BORGES C.A. Mudanças espaciais na produção de leite no Brasil. Spatial changes of milk production in Brazil. Embrapa Gado de Leite, 2024 - Juiz de Fora – MG. Grupo de Trabalho (GT): GT7. **Desenvolvimento rural, territorial e regional**. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1167338/1/Mudancas-espaciais-na-producao-de-leite-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 01 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Relatório de Recursos Mundiais: Criando um futuro alimentar sustentável, [s.l.], 2013. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/64466-mundo-precisar%C3%A1-produzir-70-mais-alimentos-at%C3%A9-2050-calcula-onu>. Acesso em: 07 mar. 2025.

ORRICO JÚNIOR, Marco A. P.; ORRICO, Ana C. A.; LUCAS JÚNIOR, Jorge de. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 31, n. 2, p. 399-410, abr. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162011000200020>. Acesso em: 14 out. 2024

ORRICO JUNIOR, Marco Antonio Previdelli *et al.* Compostagem dos dejetos da bovinocultura de corte: influência do período, do genótipo e da dieta. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s.l.], v. 41, p. 1301-1307, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/xTbLVVjBdLgpxxLph55d7vJ/?lang=pt>. Acesso em: 14 nov. 2024.

ORRICO JÚNIOR, Marco AP; ORRICO, Ana CA; LUCAS JÚNIOR, Jorge de. Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 30, p. 386-394, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/FvFJtyQn4wjprW9q7Zffm8n/?lang=pt>. Acesso em: 27 mar. 2024.

PAIXÃO, Mônica Lopes. **Uréia em dietas para bovinos: desempenho, consumo, digestibilidade, parâmetros ruminais e variação diária na excreção de indicadores**. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais – Brasil, 2004. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/aacd25a3-6871-4863-a568-aa2ba05e56e7/full>. Acesso em: 21 nov. 2024.

PARK, S.; LI, Y. Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste. **Bioresource technology**, [s.l.], v. 111, p.42-48, 2012.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412002052>. Acesso em: 26 mar. 2024.

PAUCAR, L. C. **Quantificação de metano entérico e metabolismo ruminal de bovinos alimentados com enzimas fibrolíticas e amilolíticas**, [s.l.], Tese (Doutorado em Ciências).

Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.74.2017.tde-14062017-134019>. Acesso em: 29 out. 2024.

PEDREIRA M.S.; BERCHIELLI T.T.; OLIVEIRA S. G.; PRIMAVESI O.; LIMA M.A.; FRIGHETTO R. Produção de metano e concentração de ácidos graxos voláteis ruminal em bovinos alimentados com diferentes relações de volumoso:concentrado. **41ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2004 - Campo Grande, MS NR 371 - pág. 1**. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1074241> . Acesso em: 12 maio 2015.

SILVA, D.J.; QUEIROZ, A.C. **Análise de alimentos – métodos químicos e biológicos. 3 ed.** Livro. Viçosa: UFV, 2002. 235p. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=1431655>. Acesso em: 12 maio 2025.

QUEIROZ, A.C.; NEVES, J.S.; MIRANDA, L.F.; PEREIRA, J.C.; PEREIRA, E.S.; DUTRA, A.R. Efeito do nível de fibra e da fonte de proteína sobre o comportamento alimentar de novilhas mestiças Holandês-Zebu, [s.l.], **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v.53, p.84-88, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/ykCMDwFwBC8CfG5hvVtpZbd/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 07 mar. 2025.

RAMACHANDRAN, S.; RAY, A. K. Inclusion of extruded grass pea, *Lathyrus sativus* seed meal in compound diets for rohu, *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) fingerlings. **Acta Ichthyologica et Piscatoria**, v. 34, n. 2, p. 205-218, 2004. Disponível em: http://www.aiep.pl/volumes/2000/4_2/txt/txt_08.php. Acesso em 27 mar. 2024.

RIPP, P.G. **Produção de biogás a partir de diferentes sistemas de criação de bovinocultura de leite**. Monografia Monografia (Especialização). Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. Medianeira, 2019. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/20496/1/producaodiferentescriacaoleite.pdf> Acesso em: 29 abr. 2025

RESENDE, J.A.; GODON, J.J.; BONNAFOUS A. ARCURI P.B.; SILVA, V.L.; OTENIO, M.H.; DINIZ, C.G. Seasonal Variation on Microbial Community and Methane Production during Anaerobic Digestion of Cattle Manure in Brazil. **Microb Ecol.** New York, 2015. Disponível em : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26219266/> Acesso em: 16 jan 2024.

SAADY, N.M.C.; MASSÉ, D. High rate psychrophilic anaerobic digestion of high solids (35%) dairy manure in sequence batch reactor. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.186, june 2015, p. 74-80, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.038>. Acesso em: 26 out. 2024

SALLA, Luciane Elisete. **Comportamento e características adaptativas de novilhas leiteiras em sistema de pastejo rotacionado**. Tese (Doutorado em ciências) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. Disponível em: <https://locus.ufv.br/bitstreams/218342f8-7eaf-4c3e-b049-43e320dfad15/download>. Acesso em: 26 out. 2024.

SANTOS, Izabel Aparecida; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. **Revista Agrogeoambiental**, [s.l.], v. 4, n.1, p. 41-49, 1 abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v4n12012373>. Acesso em: 07 maio 2024

SGORLON, J. G.; RIZK, M. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas. **Acta Scientiarum Technology**, [s.l.], v. 33, n. 4, p. 421-421, 2011. Disponível em: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=ALemenIAAAAJ&citation_for_view=ALemenIAAAAJ:Tyk-4Ss8FVUC Acesso em: 07 mar. 2025.

SOLÓRZANO, Laura A.R. **Efeito de fontes energéticas sobre a fermentação ruminal, produção de metano determinada pela técnica do gás traçador SF₆, digestibilidade aparente total e excreção de nutrientes em bovinos**. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/USP_5f00b4067c60914ee20ba36cb4e73476. Acesso em: 09 dez. 2024.

SOSA, R.; CHAO, R.; RÍO, J. **Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás**. Instituto de Investigaciones Porcinas. [s.l.], 25 p., 1999. Disponível em: https://fama.us.es/discovery/fulldisplay/alma99132380605256/34CBUA_US:VU1 Acesso em: 07 mar. 2025.

SOUZA, Janaína Alves. **Ambiente térmico, termorregulação e bem-estar de bovinos leiteiros**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Zootecnia) – Universidade Federal de Sergipe, Nossa Senhora do Glória, 2021. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/14617>. Acesso em: 07 abr. 2025.

SOUZA C.S.; FERNANDES, N. A. T.; RIBEIRO M.T.; LIMA, J. C. F.; CARNEIRO J. C.; FERNANDES A.J.; OTENIO, M. H. Análise físico química de dejetos de bovinos e de efluente de biodigestores no período da primavera e do verão, [s.l.], **Congresso [...]**, Embrapa, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/200182/1/Art-Anais-BiogásFert-Analise-fisico-quimica-de-dejetos-de-bovinos-e-de-efluente-de-biodigestores-no-periodo-da-primavera-e-do-verao.pdf> Acesso em: 18 out. 2024.

STARLING, J.M.C. *et al.* Análise de Algumas Variáveis Fisiológicas para Avaliação do Grau de Adaptação de Ovinos Submetidos ao Estresse por Calor. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s.l.], v.31, n.5, p.2070-2077, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/fzYmW54s9WFpBgVVY3RdpqM/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em 06 mar. 2025.

TAMMINGA, S. Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. **Journal of Dairy Science**, [s.l.], v.75, Issue 1, January 1992, pages 345-357. Disponível em: <https://research.wur.nl/en/publications/nutrition-management-of-dairy-cows-as-a-contribution-to-pollution>. Acesso em: 06 mar. 2025

TEIXEIRA, Egle Novaes. **Adaptação de Estruturas Existentes (Esterqueiras) em Biodigestores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_1771f7ab77e0d3eb34ccce492f53c6db Acesso em: 07 mar. 2025.

TIETZ, C.M. *et al.* Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, [s.l.], v. 3, p. 80-96, 2014. United States Departamento of Agriculture (USDA). **Agricultural Outlook, Fórum Program**. 2024. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/ag-outlook-forum/2024-aof-program>. Acesso em: 25 fev. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Pollution Prevention Act of 1990**, [s.l.], 1990. Disponível em: <https://www.epa.gov/p2/pollution-prevention-act-1990>. Acesso em: 04 abr. 2024.

VAN SOEST, P. J. Nutritional ecology of the ruminant. 2. ed. New York: **Cornell University Press.**, 1994.476p. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/zootecnia/nutricao/livros/NUTRICA0%20DE%20RUMI NANTES.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

YAO, Yao *et al.* Anaerobic digestion of livestock manure in cold regions: Technological advancements and global impacts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 119, p. 109494, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109494>. Acesso em: 29 mar. 2024