

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA *IN NATURA* E
ENSILADA DE CULTURAS ENERGÉTICAS

Por

EVANDRO CARLOS DAL BEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia e Grãos.

Rio Verde – GO

Novembro/2021

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA *IN NATURA* E
ENSILADA DE CULTURAS ENERGÉTICAS

Por

EVANDRO CARLOS DAL BEM

Comitê de Orientação:

Profa. Dra. Renata Pereira Marques – IF Goiano

Profa. Dra. Ana Paula Cardoso Gomide – IF Goiano

Prof. Dr. José Milton Alves – IF Goiano

Prof. Dr. Anísio da Silva Nunes – UNEMAT/MT

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

B455p Bem, Evandro Carlos Dal
POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE
BIOMASSA IN NATURA E ENSILADA DE CULTURAS ENERGÉTICAS
/ Evandro Carlos Dal Bem; orientadora Renata
Pereira Marques; co-orientadora Ana Paula Cardoso
Gomide. -- Rio Verde, 2021.
60 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação
em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia Goiano) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Biodigestão anaeróbica. 2. Composição química. 3.
Sorghum spp.. 4. Zea mays. I. Marques, Renata
Pereira, orient. II. Gomide, Ana Paula Cardoso, co-
orient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Evandro Carlos Dal Bem

Matrícula: 2019202331540027

Título do Trabalho: Potencial de produção de biogás a partir de biomassa in natura e ensilada de culturas energéticas.

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 11/11/2021

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 11/11/2021.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 4/2021 - UCPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA *IN NATURA* E ENSILADA DE CULTURAS ENERGÉTICAS

Autor: Evandro Carlos Dal Bem
Orientadora: Renata Pereira Marques

TITULAÇÃO: Mestre em Bioenergia e Grãos - Área de Concentração Agroenergia

APROVADA em 17 de setembro de 2021.

Prof.ª Dr.ª Darliane de Castro Santos
Avaliador externo - IF Goiano / Polo
de Inovação

Prof. Dr. Pablo Diego da Silva
Cabral
Avaliador interno - IF Goiano / Polo
de Inovação

Prof.ª Dr.ª Renata Pereira Marques
Presidente da Banca - IF Goiano / Polo de Inovação

Documento assinado eletronicamente por:

- Pablo Diego Silva Cabral, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/09/2021 14:11:56.
- Darliane de Castro Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/09/2021 11:34:25.
- Renata Pereira Marques, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/09/2021 11:16:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/09/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 3D6134
Código de Autenticação: 9ax53dda64



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 49/2021 - UCPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA Nº 43 (QUARENTA E TRÊS)
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos dezessete dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e um, às 08h00min (oito horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **EVANDRO CARLOS DAL BEM**, discente do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pela presidente da Banca Examinadora, Prof.^a Dr.^a Renata Pereira Marques, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Dissertação que, em 28 min., procedeu à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM BIOENERGIA E GRÃOS**, na área de concentração Agroenergia, pelo Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGBG da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Renata Pereira Marques	IF Goiano - Polo de Inovação	Presidente
Pablo Diego Silva Cabral	IF Goiano - Polo de Inovação	Membro interno
Darlíane de Castro Santos	IF Goiano - Polo de Inovação	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Pablo Diego Silva Cabral**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/09/2021 14:09:58.
- **Darlíane de Castro Santos**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/09/2021 11:34:00.
- **Renata Pereira Marques**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/09/2021 11:11:55.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/09/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 306133

Código de Autenticação: a75ee93e0e



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3620-5600

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de mestrado é fruto não apenas de um esforço pessoal, mas também de um sonho.

Assim, agradeço, primeiramente, a Deus que me permitiu realizar este sonho. Quero agradecer ainda algumas pessoas especiais que estiveram comigo até aqui, me incentivando e me apoiando de forma direta ou indireta.

À minha querida esposa, Neila, e aos meus filhos, Emanuele e Antonio, que foram fundamentais para que eu conseguisse concluir o mestrado. Eles contribuíram diretamente para que eu pudesse ter um caminho mais fácil e prazeroso durante esses anos.

À professora e orientadora, Dra. Renata Pereira Marques, agradeço por ter acreditado em mim, no meu projeto, bem como, pelo pronto atendimento e disponibilidade de tempo.

Aos meus coorientadores: Prof.^a Dra. Ana Paula Cardoso Gomide, Prof. Dr. José Milton Alves e, em especial, o Prof. Dr. Anísio da Silva Nunes que foi fundamental na estruturação do projeto. A eles, os meus sinceros agradecimentos.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, pela disponibilidade do curso de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos e pela oportunidade que me foi dada, de poder cursar essa etapa tão importante de minha vida acadêmica em uma instituição tão reconhecida.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo geral.....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1. Cenário energético mundial.....	8
3.2. Biomassa.....	11
3.3. Biogás.....	12
3.4. Biodigestão.....	14
3.5. Substratos para produção de biogás.....	18
3.6. Milho.....	19
3.7. Sorgo.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1. Análises de variância.....	29
5.2. Massa fresca, massa seca e relação entre massa fresca e massa seca.....	30
5.3. Características químicas.....	34
5.4. pH.....	41
5.5. Produção de biogás.....	44

5.6. Temperatura.....	49
5.7. Custos de produção.....	51
6. CONCLUSÕES.....	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado da digestão anaeróbica.....	15
Figura 2 – Partículas vegetais.....	25
Figura 3 – Biodigestor de batelada para escala laboratorial.....	25
Figura 4 – Silo de laboratório.....	26
Figura 5 – Modelo quadrático da produção média de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$) obtida a partir do material <i>in natura</i> , em função da temperatura diária ($^{\circ}\text{C}$), Diamantino, MT, 2020.....	50
Figura 6 – Modelo quadrático da produção média de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$) obtida a partir do material ensilado, em função da temperatura diária ($^{\circ}\text{C}$), Diamantino, MT, 2020.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa fresca (t ha ⁻¹) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	30
Tabela 2 – Massa seca (t ha ⁻¹) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	32
Tabela 3 – Relação entre massa fresca e massa seca de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	34
Tabela 4 – Proteína bruta (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	35
Tabela 5 – Fibra bruta (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	36
Tabela 6 – Extrato etéreo (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.	37
Tabela 7 – Matéria mineral (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	38
Tabela 8 – Teor de MS (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	39
Tabela 9 – pH inicial obtido a partir do material <i>in natura</i> de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	42
Tabela 10 – pH inicial obtido a partir do material ensilado, de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	42

Tabela 11 – pH final obtido a partir do material <i>in natura</i> de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	43
Tabela 12 – pH final obtido a partir do material ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	44
Tabela 13 – Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$) obtido a partir do material <i>in natura</i> de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	45
Tabela 14 – Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$) obtido a partir do ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	45
Tabela 15 – Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) obtido a partir do material <i>in natura</i> de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	46
Tabela 16 – Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) obtido a partir do material ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	47
Tabela 17 – Volume total de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$) obtido a partir do material <i>in natura</i> de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	47
Tabela 18 – Volume total de biogás em $\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$ (VT) obtido a partir do material ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.....	48
Tabela 19 – Custo médio (U\$\$ Nm^{-3}) de produção de biogás a partir de material <i>in natura</i> e ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho, Diamantino, MT, 2020.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS

% – Porcento

ABiogás – Associação Brasileira de Biogás

AGV – Ácidos graxos voláteis

AIE – Agência Internacional de Energia

C.V.% – Coeficiente de variação

CO₂ – Dióxido de carbono

EE – Extrato etéreo

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FB – Fibra bruta

GEE – Gases do efeito estufa

GL – Graus de liberdade

ha – Hectare

IMEA – Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária

kg - Quilograma

L – Litro

m – Metro

m² – Metro quadrado

MF – Massa fresca

MF/MS – Relação entre massa fresca e massa seca

MM – Matéria mineral

mm – Milímetro

MS – Massa seca

NaCO₃ – Carbonato de sódio

Nm³ – Normal metro cúbico °C – Graus Celsius

PB – Proteína bruta

RSU – Resíduos sólidos urbanos ST – Sólidos totais

T – Temperatura

t – Tonelada

TMS – Teor de massa seca

US\$ – Dólares

VM – Volume médio de biogás

VMHa – Volume médio de biogás em Nm³ ha⁻¹ dia⁻¹

VT – Volume total de biogás

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASSA *IN NATURA* E
ENSILADA DE CULTURAS ENERGÉTICAS

Por

EVANDRO CARLOS DAL BEM

(Sob orientação da Prof.^a Dra. Renata Pereira Marques – IF Goiano)

RESUMO

A busca por energias limpas é crescente, com destaque para o biogás provindo de biomassa (*in natura* ou ensilada) de culturas como o milho e o sorgo. Objetivando a determinação do potencial de produção de biogás a partir da biomassa *in natura* e ensilada de culturas energéticas, produzidas na safrinha, em solo arenoso e argiloso, desenvolveu-se o presente trabalho. O experimento foi realizado na Fazenda Paiaguás, Diamantino – MT, utilizando delineamento experimental de blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial de 6x2, sendo seis materiais (Milho P30S31, Sorgo AGRI002E, Sorgo NUCOVER 100, Sorgo NUGRAIN 430, Sorgo AGROMEN AGN 10S20 e Sorgo NUSIL 426) e dois tipos de solo (arenoso e argiloso). Foram avaliadas, para o material *in natura* e ensilado, a massa fresca e seca; proporção entre massa fresca e massa seca; porcentagem de proteína bruta, fibra bruta, extrato etéreo, matéria mineral e teor de massa seca; volume médio e volume total de biogás; pH inicial e final. Aplicou-se o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de significância de 5% e análise de regressão para os fatores temperatura e produção média de biogás. As produções de biomassa fresca e seca foram satisfatórias para todos os materiais, especialmente quando cultivadas em solo argiloso, com destaque para os materiais de sorgo, que, pela maior produção de biomassa, são mais indicados para a produção

de biogás do que o material Milho P30S31. Os materiais apresentaram composições adequadas ao processo de biodigestão e indicam possibilidade de utilização na alimentação animal ou como materiais de duplo propósito. As produções de biogás não foram influenciadas pelos diferentes materiais ou tipos de solo. Apesar dos custos relativamente elevados, o cultivo de culturas energéticas para a produção de biogás é viável quando se considera o uso da terra.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestão anaeróbica; Composição química; *Sorghum* spp.; *Zea mays*.

BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM FRESH AND ENSILATED BIOMASS ENERGY CROPS

Por

EVANDRO CARLOS DAL BEM

(Sob orientação da Profa. Dra. Renata Pereira Marques – IF Goiano)

ABSTRACT

The search for clean energy is growing, especially considering biogas from biomass (in natura or ensiled) from crops such as corn and sorghum. This work aims to determine the potential for biogas production from in natura and ensiled biomass of energy crops, produced in the off-season, in sandy and clayey soil. The experiment was carried out at Fazenda Paiaguás, Diamantino, state of Mato Grosso, using a randomized block design with four replications. The treatments were arranged in a 6x2 factorial scheme, with six materials (Maize P30S31, Sorghum AGRI002E, Sorghum NUCOVER 100, Sorghum NUGRAIN 430, Sorghum AGROMEN AGN 10S20 and Sorghum NUSIL 426) and two types of soil (sandy and clayey). The work evaluated for in natura and ensiled material: fresh and dry mass; proportion between fresh and dry mass; percentage of crude protein, crude fiber, ether extract, mineral matter and dry mass content; average volume and total volume of biogas; initial and final pH. Tukey's mean comparison test was applied at a significance level of 5% and regression analysis for the factors temperature and mean production of biogas. The production of fresh and dry biomass was satisfactory for all materials, especially when cultivated in clayey soil, with emphasis on sorghum materials, which, due to the higher biomass production, are more suitable for the production of biogas than the corn material P30S31. The materials had compositions suitable for the biodigestion process and indicate the possibility of use in animal feed or as dual purpose materials. Biogas productions

were not influenced by different materials or soil types. Despite the relatively high costs, growing energy crops for biogas production is viable when considering land use.

KEYWORDS: Anaerobic Biodigestion; Chemical composition; Sorghum spp.; Zea mays.

1. INTRODUÇÃO

A grande demanda pelo consumo de energia mundial, juntamente com o aumento dos preços do principal insumo que gera essa energia, o petróleo, traz à tona o assunto da dependência energética para com esse insumo. Atualmente, além da instabilidade de fornecimento do petróleo pelos países produtores, há também um apelo muito forte por parte da sociedade em reduzir o consumo dele (vistas suas implicações nas mudanças climáticas), em prol do uso de energias limpas.

Dentre as várias opções de energia limpa existentes, a biomassa é uma considerável alternativa, principalmente para o Brasil que, pelas condições edafoclimáticas, pode ser favorecido na exploração das culturas bioenergéticas e, conseqüentemente, na produção de biomassa e de biogás. Nesse sentido, as culturas agrícolas anuais da família Poaceae, especialmente milho e sorgo, amplamente conhecidas pela alta produção de biomassa vegetal e cultivadas após a safra de verão, podem se apresentar como uma alternativa viável de matéria-prima para a produção de biogás.

Nos Estados do centro-oeste brasileiro, é comum o cultivo de milho segunda safra. No entanto, parte dessas lavouras são cultivadas em solos arenosos, de menor fertilidade química e menor capacidade para retenção de água, causando redução nos índices produtivos da cultura. Por esse motivo, o cultivo de culturas mais eficientes no uso da água e de nutrientes, tal como o sorgo, pode constituir uma opção interessante para essa região.

Apesar de o cultivo de milho e sorgo, após a safra de verão, ser utilizado como matéria-prima na produção de biogás e apresentar-se promissor no centro-oeste, são escassos os estudos sobre o tema, considerando as condições edafoclimáticas da região.

Além disso, não existem pesquisas que avaliem a produção de biogás a partir de culturas

energéticas tanto na forma *in natura*, para ser utilizada no momento da colheita, como na forma ensilada, para ser aproveitada durante todo o ano, o que evitaria sazonalidade na produção do biogás e da bioenergia.

1. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o potencial de produção de biogás a partir da biomassa *in natura* e ensilada de culturas energéticas, produzidas na safrinha, em solo arenoso e argiloso.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a produção de biomassa fresca e seca do Milho P30S31, e sorgos AGRI002E, NUCOVER 100, NUGRAIN 430, AGROMEN AGN 10S20 e NUSIL 426, produzidos na safrinha, em solo arenoso e argiloso.
- Realizar análise de composição química do material *in natura* do Milho P30S31, e sorgos AGRI002E, NUCOVER 100, NUGRAIN 430, AGROMEN AGN 10S20 e NUSIL 426, produzidos na safrinha, em solo arenoso e argiloso.
- Analisar a produção de biogás da biomassa *in natura* e ensilada do Milho P30S31, e sorgos AGRI002E, NUCOVER 100, NUGRAIN 430, AGROMEN AGN 10S20 e NUSIL 426, produzidos na safrinha, em solo arenoso e argiloso.
- Indicar o material mais adequado para produção de biogás em solo arenoso ou argiloso.
- Avaliar o custo de produção do metro cúbico de biogás, de acordo com a cultura energética de origem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cenário energético mundial

Devido ao aumento do consumo de energia em processos industriais e nos lares, desde 1980, a demanda global de energia dobrou e, segundo previsões da Agência Internacional de Energia (2012), a mesma ainda poderá aumentar em 85% até 2050. De acordo com Flores (2009), essa situação, associada ao crescimento populacional e aumento na demanda por alimentos, constituem o problema deste século.

O abastecimento mundial de energia é baseado, principalmente, em fontes não-renováveis, as quais chamamos de combustíveis fósseis e que se caracterizam pela sua esgotabilidade, uma vez que diminuem com o consumo. São exemplos: petróleo, gás natural, entre outros (Camargo 2012). De acordo com Popp *et al.* (2021), na oferta total de energia primária mundial, os combustíveis fósseis representam 81%. No Brasil, do total de energia primária gerada, 59% é derivada de fontes de energia não-renováveis, com destaque para o petróleo, o gás natural e o carvão vapor (EPE 2020).

As fontes não-renováveis, além de serem fontes finitas, com vida útil calculada de 100 a 300 anos (Wünsch *et al.* 2012), emitem gás carbônico (CO₂) por meio de sua queima. O CO₂ é um dos chamados gases do efeito estufa (GEE), os quais promovem a retenção de calor na superfície da Terra. Esse fenômeno, conhecido como efeito estufa, é um fenômeno natural e permite a existência de vida no planeta. No entanto, as atividades antrópicas e naturais estão promovendo aumento na emissão desses gases e a intensificação do efeito estufa, o que contribui para o aquecimento global e para mudanças climáticas (Ostovareh; Karimi; Zamani 2015; Edrisi & Abhilash 2016).

Apesar de representarem a maior fração no fornecimento de energia, busca-se, cada vez mais, alternativas às fontes de energia não-renováveis. Isto se deve, principalmente, à crescente consciência ambiental da população; depleção na produção destes combustíveis fósseis; aumento no custo de extração e transporte; necessidade de utilização do petróleo para fabricação de produtos mais nobres como os polímeros e plásticos; e interesse por parte dos países importadores de petróleo em reduzir a dependência energética (Silva & Campos 2008; Berti *et al.* 2015; Jylhä & Bergström 2016).

Segundo Schwengber & Coelho (2016), o fornecimento mundial de energia é imprescindível para o desenvolvimento econômico. Sendo assim, e tendo em vista que a demanda por energia é crescente e o aumento na geração e no fornecimento de energia é inevitável, percebe-se o esgotamento do modelo energético baseado em combustíveis não-renováveis, surgindo, então, a necessidade de se buscar fontes de energia renováveis (Theuretzbacher *et al.* 2013; Dahunsi *et al.* 2019; Serrano-Ruiz 2020).

Por este motivo, intensificou-se a realização de pesquisas, iniciativas empresariais e políticas públicas relacionadas ao desenvolvimento de sistemas de fornecimento de energia sustentável. Estas ações, conforme afirmam Berti *et al.* (2015), visam cobrir a demanda de energia de fontes renováveis a fim de que essas tenham participação significativa nas matrizes energéticas de países desenvolvidos e em desenvolvimento.

As fontes de energias renováveis são caracterizadas por serem inesgotáveis, sendo conhecidas como fontes verdes de energia, uma vez que sua produção e utilização trazem benefícios ambientais e econômicos, principalmente no que diz respeito à redução nas emissões de GEE (Almeida 2016; Popp *et al.* 2021).

Dentre as fontes de energia renováveis existentes, pode-se citar: solar, eólica, hidráulica, biomassa e geotérmica (Camargo 2012). Uma das alternativas tecnológicas mais promissoras diz respeito ao aproveitamento da biomassa para geração de energia (Galbiatti *et al.* 2010), de modo

que vêm se dando atenção significativa a ela (Miah *et al.* 2011). De acordo com Cortez *et al.* (2008), isso se deve ao fato de que, analisando-se as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica possui a flexibilidade de suprir energéticos, tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

Mundialmente, a oferta total de energia primária gerada a partir de fontes renováveis corresponde a 14%, valor muito aquém do total provindo das fontes não-renováveis (Popp *et al.* 2021). Os motivos que dificultam a adoção de fontes renováveis estão relacionados a problemas de motivação política, de cunho legal, financeiro, fiscal, de capacitação tecnológica, de informação, educação e treinamento (Costa & Prates 2005). Como exemplos desses problemas podem ser citados: ausência de subsídios (Sorda; Bamse; Kemfert 2010) e de isenção de taxas; custos elevados (Delzeit; Britz; Holm-Müller 2012); não planejamento de aparatos industriais e tecnologias que permitam a comercialização; ausência de financiadores (Souza *et al.* 2019); e, sobretudo, a falta conhecimento e confiança no potencial das energias renováveis (Barcelos 2009).

No entanto, tendo em vista que o setor energético baseado em fontes renováveis cresce a uma taxa global de 2,5% ao ano, estima-se que, dentro de 20 anos, cerca de 30% do total da energia consumida pela humanidade será proveniente das fontes renováveis (Cortez *et al.* 2008; Jylhä & Bergström 2016), em especial a biomassa. Isto porque, no mundo todo, 70% do total de energia proveniente de fontes renováveis de energia são obtidos a partir da biomassa (Popp *et al.* 2021), sendo as perspectivas associadas a ela bastante positivas.

No Brasil, de acordo com dados do último Balanço Energético Nacional – BEN (EPE 2020), a fatia representada pelas fontes renováveis na produção primária de energia equivale a 41% sendo que, do total, 16,2% são oriundos de produtos da cana-de-açúcar, classifica como fonte de biomassa. Esse fato, associado às características agrícolas do Brasil, demonstra que o país apresenta

grande capacidade de produção de energia a partir da biomassa. Além disso, vale salientar que, apesar de ainda não existir um mercado estável no país para o uso e comercialização total de energia produzida a partir de biomassa (Januzzi 2002), o Brasil possui experiência notória na área, com o maior programa de biomassa líquida do mundo: o Pró-álcool.

3.2. Biomassa

Biomassa é qualquer material orgânico proveniente de plantas e animais, suscetível de aproveitamento energético. Essa é a única fonte de carbono renovável disponível em nosso planeta, sendo o substituto natural dos combustíveis fósseis para a geração de energia e produtos com carbono em sua composição (Santos 2009; Serrano-Ruiz 2020).

A biomassa pode ser derivada de diferentes fontes, como culturas energéticas *in natura* ou ensiladas (cana-de-açúcar, milho, sorgo, etc.), algas, madeira, biofluidos (como, por exemplo, os óleos vegetais de soja e o de mamona), resíduos urbanos, industriais, florestais e agrícolas (bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, melaço, etc.), entre outros (Zhong 2011; Arun *et al.* 2021).

Uma vez que a biomassa apresenta diferentes origens, ela apresenta composição variável. Isso faz com que cada material apresente particularidades na sua composição. Porém, de modo geral, a biomassa é composta por longas cadeias de hidrocarbonetos, as quais constituem moléculas complexas, tais como, amidos, açúcares, lipídeos e lignoceluloses (Serrano-Ruiz 2020). Os hidrocarbonetos constituem reações exotérmicas e, por serem muito reativos, garantem à biomassa grande poder de geração de energia (Camargo 2012). Além disso, esses compostos são altamente oxigenados (Cortez *et al.* 2008), o que, segundo Almeida (2016), torna a biomassa menos poluente, já que ela requer menos oxigênio do ar durante a geração de energia.

Além da diversidade de fontes da qual deriva a biomassa, existe uma ampla diversidade de

produtos combustíveis dela derivados e que podem produzir energia. A biomassa pode ser transformada através de vários processos de conversão em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos que, por sua vez, podem produzir calor, eletricidade e combustíveis para os meios de transporte (Santos 2009). O bioetanol, o biodiesel e o biogás são exemplos de combustíveis derivados da biomassa (Theuretzbacher *et al.* 2013; Serrano-Ruiz 2020).

Segundo Wit & Faaij (2010), na Europa, a produção de energia a partir da biomassa pode atingir até 12,8 EJ por ano, o que demonstra a elevada capacidade de produção de energia através dessa fonte. Além disso, outras vantagens da utilização da biomassa na geração de energia estão relacionadas à sua abundância e aos benefícios ambientais, energéticos e sociais resultantes da sua utilização, que incluem redução das emissões de GEE, redução da dependência energética, prevenção de incêndios florestais e melhoria da produtividade florestal, assim como a criação de empregos (Santos, 2009).

Na Europa e em outros países como China e Índia, está se intensificando o estabelecimento de tecnologias de produção de bioenergia a partir de culturas energéticas e resíduos agrícolas (Wannasek *et al.* 2019). Portanto, tendo em vista a direção seguida pelas nações ao redor do mundo e a crise ambiental vigente, é necessário que as pesquisas nacionais também se debrucem sobre a utilização da biomassa na produção de energia (Camargo 2012), em especial a produção de biogás, visto que, segundo Coelho (2018), o Brasil apresenta elevada capacidade e potencial de produção desse produto.

3.3. Biogás

O biogás é um biocombustível produzido pela digestão anaeróbia de materiais biológicos provenientes do setor agrícola, aterros sanitários, dejetos animais, efluentes industriais e plantas aquáticas (Silva 2017; Agostini *et al.* 2016).

A composição do biogás apresenta, no geral, entre 50 e 80% de gás metano, 20 e 50% de gás carbônico (CO₂) e pequenas porcentagens de gases traços como: sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis, oxigênio, hidrocarbonetos e vapor d'água (Galbiatti *et al.* 2010; Petravić-Tominac *et al.* 2020). Essa composição pode variar de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa empregada na sua produção, fatores climáticos, dimensões do biodigestor, entre outros (Almeida 2016).

Tendo em vista que o metano, ao ser lançado na atmosfera, apresenta potencial de poluição 21 vezes maior do que o CO₂, e que aquele corresponde à maior parcela na composição do biogás, a utilização do biogás, e consequente queima de metano, evita que o metano seja liberado na atmosfera, reduzindo as consequências do efeito estufa (Almeida 2016). Sendo assim, de acordo com Agostini *et al.* (2016), a produção e o uso de biogás são normalmente percebidos como uma opção para geração de energia limpa e sustentável, que pode garantir reduções significativas na emissão de GEE se comparada aos combustíveis fósseis.

Além das vantagens ambientais, o biogás apresenta outros benefícios relacionados à sua produção e utilização. O biogás pode ser gerado de forma contínua; ele apresenta baixo custo de estocagem, seja na forma de matéria-prima, seja como gás comprimido; é fator de segurança energética, podendo diminuir as dificuldades de atendimento da demanda por energia elétrica em áreas distantes do meio rural; apresenta possibilidade eventual de venda de eletricidade à rede ou Compensação de Energia Elétrica; promove a geração de empregos; permite o aproveitamento de resíduos urbanos, o que colabora para a viabilidade econômica do saneamento básico; reduz a contaminação do solo e dos lençóis freáticos pelos resíduos, etc (Milanez *et al.* 2018).

Inicialmente, o biogás era utilizado como fonte de energia térmica, sendo aproveitado de maneira rústica em fogões e fornos (Ferraz & Marriel 1980). Atualmente, essa forma de utilização é verificada somente em pequenas e médias propriedades rurais, onde a produção de biogás é realizada para uso próprio. Em escala comercial, o biogás é aplicado, principalmente, na geração

de energia elétrica e na fabricação de biometano. Esse fato se deve ao desenvolvimento das pesquisas sobre o assunto, as quais permitiram que o biogás passasse de um simples coproduto do tratamento de resíduos orgânicos, para uma “*commodity*”, sendo negociada na bolsa de valores em forma de créditos de Carbono, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Almeida 2016; Senghor *et al.* 2016; Petravić-Tominac *et al.* 2020).

De acordo com Milanez *et al.* (2018), o biogás ainda representa uma parcela pouco significativa da produção primária de energia no mundo: em 2015, menos de 0,3% do total produzido teve origem em biogases, ou seja, cerca de 31 milhões de toneladas de óleoequivalente. Porém, sob outra perspectiva, o biogás foi a terceira fonte de energia renovável com maior taxa de crescimento anual no período de 1990-2015, aumentando 12,8% ao ano.

No Brasil, no ano de 2019, a produção de biogás foi de aproximadamente 3.600 Nm³ dia⁻¹, tendo participação de 0,09% na oferta interna de energia (ABiogás 2019). No entanto, ainda de acordo com dados da Associação Brasileira de Biogás e Biometano – ABiogás (2019), a produção de biogás no país está muito aquém de seu potencial teórico total de geração, o qual equivale a 117 milhões de Nm³ dia⁻¹ e representa 34,5% da demanda de energia elétrica. Isso se deve, principalmente, ao maior custo para instalação de geradoras de energia baseadas em fontes renováveis e ausência de incentivos, tais como subsídios. Além disso, pode-se citar a dificuldade de consolidar as técnicas de produção e de organizar a distribuição e comercialização deste tipo de energia (Carvalho 2009; Santos; Frigo; Nogueira 2014; Losekann & Hallack 2018). Sendo assim, estudos nacionais relacionados ao processo de produção e fontes de matéria-prima são imprescindíveis e de grande valor para o desenvolvimento do país.

3.4. Biodigestão

O processo de formação do biogás é chamado de biodigestão. Nele, bactérias anaeróbicas

promovem a quebra das estruturas orgânicas que compõem a biomassa, originando compostos simples como metano, dióxido de carbono, água e outros (Almeida 2016). A digestão anaeróbia é realizada por um complexo de microrganismos e apresenta quatro fases, de acordo com a Fig. 1: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Michalska & Ledakowicz 2013).

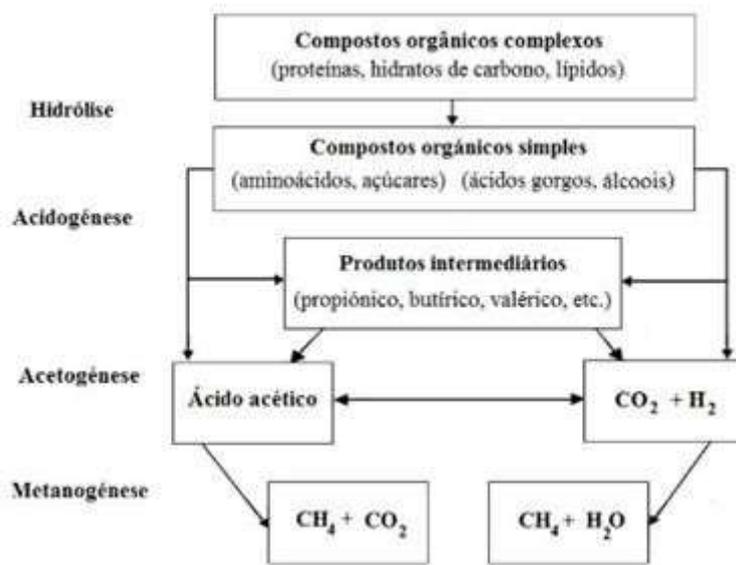


Figura 1. Esquema simplificado da digestão anaeróbica Fonte: Adaptado de Abad 2015

Durante a hidrólise, microrganismos hidrolíticos decompõem a matéria orgânica complexa em moléculas solúveis simples, ou seja, carboidratos complexos, gorduras e proteínas são hidrolisados em açúcares, ácidos graxos e aminoácidos (Milanez *et al.* 2018). Dentre os gêneros de bactérias hidrolíticas que se destacam na digestão anaeróbia, citam-se: *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus* (gêneros produtores de lipases para degradação de lipídeos à ácidos graxos); e *Bacteroides*, *Butyvirbio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Proteus*, *Peptococcus* e *Bacillus* (gêneros produtores de proteases para degradação de proteínas à aminoácidos) (Anderson; Sallis; Uyanik 2003).

Em seguida, bactérias acidogênicas convertem essas moléculas solúveis simples em uma mistura de ácidos graxos voláteis (AGV) e em outros produtos menores, como álcoois (Zhao *et al.*

2020). De acordo com Mendonça (2009), os gêneros de bactérias acidogênicas mais comuns em reatores anaeróbios são: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia*.

Na acetogênese, os principais organismos envolvidos são as arqueas acetogênicas, em especial aquelas pertencentes aos gêneros *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas*. Essas, então, convertem os AGVs em ácido acético, CO₂ e hidrogênio, substratos intermediários que serão metabolizados pelas bactérias metanogênicas durante a metanogênese (Michalska & Ledakowicz 2013; Soares; Feiden; Tavares 2017).

A partir dos substratos originados na fase anterior, as bactérias metanogênicas produzem o biogás no último passo, denominado metanogênese (Milanez *et al.*, 2018; Zhao *et al.* 2020). As bactérias metanogênicas pertencem ao grupo das archeas e podem ser divididas em dois grupos: metanogênicas acetoclásticas e metanogênicas hidrogenotróficas. As metanogênicas acetoclásticas, como os gêneros *Methanosarcina* e *Methanosaeta*, por exemplo, utilizam o ácido acético como fonte de energia e carbono e são responsáveis por 60 a 70% de toda produção de metano (Mendonça 2009; Soares; Feiden; Tavares 2017). Já as metanogênicas hidrogenotróficas utilizam o gás carbônico como fonte de carbono e sãoceptoras de átomos de hidrogênio, sendo que esse atua como fonte de energia (Louzada 2006). De acordo com Bitar (2003) e Morris (2011), os principais gêneros de metanogênicas hidrogenotróficas são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter*, *Methanoculleus* e *Methanocorpusculum*.

O desempenho da digestão anaeróbia depende tanto das características da matéria-prima quanto da atividade dos microrganismos envolvidos nas diferentes etapas de degradação, a qual pode ser influenciada pelo desequilíbrio entre os grupos microbianos, temperatura, pH, macro e micronutrientes. Por esse motivo, a digestão anaeróbica nos sistemas de produção de biogás é mais frequentemente realizada em condições mesófilas (35 - 42 °C) ou termófilas (45 - 60 °C), e com

pH entre 6,5 - 8,5, sendo o pH ótimo entre 7,0 – 8,0 (Petravić-Tominac *et al.* 2020).

Além do biogás, o processo de biodigestão também promove a formação de um produto secundário e que pode ser usado como fertilizante devido às suas excelentes propriedades fertilizantes. Esse composto é eficiente e ecologicamente correto e pode competir com fertilizantes minerais, uma vez que contém todos os nutrientes e micronutrientes necessários para a agricultura moderna, incluindo nitrogênio, fósforo e potássio (Koblenz *et al.* 2014; Dahunsi *et al.* 2019).

A digestão anaeróbica pode ocorrer em escala doméstica, agrícola e industrial e, em todos os casos, é realizada de maneira controlada em equipamentos chamados biodigestores, que são reatores biológicos onde acontecem os processos de fermentação e produção do biogás. Os biodigestores podem apresentar diferentes modelos, variando conforme o tipo de matéria-prima, tecnologia aplicada e escala de produção (Petravić-Tominac *et al.* 2020).

No Brasil, conforme descrito por Almeida (2016), os principais modelos de biodigestores utilizados são: modelo indiano, modelo chinês, biodigestores de alto rendimento, modelo *plug flow* (canadense)/tubular, reator tipo UASB. Os tipos de biodigestores devem ser conhecidos e analisados antes da escolha, visando atender às necessidades de cada propriedade, sendo que a escolha do modelo mais adequado deve ser realizada pelo próprio usuário.

Cada biodigestor é adequado aos diferentes tipos de matéria-prima, podendo ser operados com cargas contínuas, quando se alimenta o biodigestor diariamente, ou em batelada, quando os materiais são colocados no biodigestor e deixados por um determinado período, onde sofrerão ação das bactérias anaeróbicas, produzindo o biogás (Ferraz & Marriel 1980).

Para realização do processo de digestão anaeróbica em biodigestores, geralmente, utiliza-se mistura composta pelo substrato (biomassa), água (para manutenção da umidade e favorecimento dos processos mediados pelas bactérias), solução tampão (a fim de manter o pH do meio adequado para a sobrevivência e atividade das bactérias) e inóculo (para incentivar e acelerar o processo de biodigestão) (Araújo 2017).

Na maioria dos casos, o tamponamento do meio é realizado pela adição de NaCO₃, enquanto o principal inóculo utilizado é o esterco bovino. A quantidade de inoculante a ser utilizada na mistura é dada pela seguinte fórmula, sendo que, na maioria dos casos, assume-se que o fator de inóculo é igual a 0,2 (Barcelos 2009):

$$FI = \frac{STi}{STi + STs}$$

Em que:

FI = fator de inóculo;

STi = sólidos totais do inóculo;

STs = sólidos totais do substrato

O NaCO₃, geralmente, é empregado na proporção de 0,06 kg/kg ST, sendo ST igual a 25%; enquanto a água é adicionada até que a umidade da mistura esteja entre 75 e 80% ou numa proporção de 0,58 L/kg de inoculante (Barcelos 2009; Araújo 2017)

3.5. Substratos para produção de biogás

Uma ampla gama de matérias-primas orgânicas pode ser estabilizada por digestão anaeróbica, como, por exemplo: (1) fezes, esterco e dejetos da criação animal; (2) silagem e matérias-primas lignocelulósicas renováveis; (3) subprodutos orgânicos de indústrias alimentícias e matadouros; (4) fração biodegradável dos resíduos sólidos urbanos (RSU), também chamada de fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU); e (5) biomassa microbiana (Senghor *et al.* 2016; Pérez-Rodríguez; García-Bernet; Domínguez 2017).

O maior potencial para a produção de biogás está nas matérias-primas lignocelulósicas que

contêm três principais constituintes estruturais: celulose 30 - 50%, hemicelulose 20 - 40% e lignina 10 - 25% (Petravić-Tominac *et al.* 2020). Segundo Dahunsi *et al.* (2019), esses materiais são, geralmente, obtidos de quatro fontes principais: resíduos agrícolas, por exemplo, palha de milho, palha de arroz, caule de sorgo, etc.; resíduos florestais, por exemplo, biomassa de folhas, madeiras e lascas, galhos, folhagem, etc.; culturas energéticas (girassol, cana-de-açúcar, milho, sorgo, etc.); e materiais celulósicos como resíduos de alimentos, gramíneas, resíduos de celulose e papel, fração orgânica de resíduos sólidos municipais etc.

No Brasil, as principais fontes de produção de biogás no Brasil são os aterros sanitários (51%), a indústria de alimentos e bebidas (25%), a suinocultura (14%) e o lodo de esgoto (6%) (Milanez *et al.* 2018). Devido ao elevado potencial de produção de biogás por parte dos materiais lignocelulósicos e pelo fato de o Brasil ser um país agrícola com expressiva produção de culturas energéticas, os estudos sobre a utilização de milho e sorgo na produção de biogás vem se expandido.

A produção de biogás a partir de culturas de cereais, como é o caso do milho e do sorgo, pode ser realizada a partir da matéria-prima *in natura* ou ensilada. A ensilagem é realizada a fim de aperfeiçoar a produção de biogás, uma vez que essa técnica permite o armazenamento da biomassa, mantendo o conteúdo energético das culturas e garantindo satisfatório valor de nutrientes para biodigestão anaeróbia (Almeida 2016).

3.6. Milho

O milho *Zea mays* L. é, atualmente, a cultura energética com maior relevância mundial na produção de biogás, devido, principalmente, ao seu alto potencial de produção de matéria seca, composição química e elevado rendimento na produção de metano (Windpassinger *et al.* 2015; Wannasek *et al.* 2017; Samarappuli & Berti 2020). Na Alemanha, por exemplo, mais de 50% das

terras disponíveis para a produção de biogás são cultivadas com milho, o qual produz entre 13 e 23 t de matéria seca ha⁻¹ (Wünsch *et al.* 2012).

Na grande maioria das vezes, o milho, para produção de biogás, é ensilado (Schittenhelm 2009; Senghor *et al.* 2016). A silagem de milho, de acordo com Berti *et al.* (2015), é considerada um substrato chave para a produção de biogás agrícola devido ao seu alto potencial de rendimento de biomassa e composição química, incluindo alto teor de carboidratos solúveis e proteínas, bem como ingredientes fibrosos estruturais, celulose, hemicelulose, amido e teor de açúcar.

No entanto, a cultura do milho apresenta também grande importância na fabricação de rações e na alimentação humana, fazendo com que a maior parcela de sua produção seja destinada a esses fins. Ademais, o aumento do ataque de pragas e de doenças da cultura, além da ocorrência de estresses hídricos podem afetar, significativamente, os rendimentos da cultura (Samarappuli & Berti 2020), surgindo, assim, a necessidade de realização de pesquisas para a utilização de novas culturas energéticas para produção de biogás (Windpassinger *et al.* 2015).

Nos Estados do centro-oeste brasileiro, é comum o cultivo de milho segunda safra. Porém, em muitos casos, esse cultivo é realizado em solos arenosos, de menor fertilidade química e menor capacidade de retenção de água, causando redução nos índices produtivos da cultura. Nesse contexto, por se tratar de cultura tolerante a diversos estresses e menos exigente que o milho, do ponto de vista da fertilidade, o sorgo vem despertando um interesse cada vez mais crescente.

3.7. Sorgo

Dentre as culturas energéticas com potencial para substituição do milho na produção de biogás, destaca-se o sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench). Pertencente à família *Poaceae*, apresenta crescimento rápido e elevada produção biomassa (Theuretzbacher *et al.* 2013), a qual pode atingir índices produtivos entre 50 e 100 t ha⁻¹, com teor de matéria seca (MS) de até 35 g kg⁻¹

¹ (Pazderù *et al.*, 2014).

Em estudo realizado por Amaducci *et al.* (2020), verificou-se que, mesmo em condições de suprimento reduzido de água e nitrogênio, o sorgo produziu maior quantidade de biomassa do que o milho, demonstrando alta eficiência no uso da água e do nitrogênio. Isso indica que a cultura do sorgo é mais tolerante ao déficit hídrico e exige menor aporte de fertilizante no seu cultivo, o que reduz os custos de produção (Salimbeni 2013) e permite seu cultivo em sistemas com reduzida entrada de insumos. Além disso, a cultura permite a manutenção da flexibilidade nas rotações de culturas (Windpassinger 2015) e demonstra adaptação a diferentes ambientes e condições de solo, inclusive em terras marginais, conforme verificado por Gelfand *et al.* (2013).

Outra vantagem relacionada ao cultivo do sorgo, é que esse pode ser facilmente cultivado por sementes, utilizando-se práticas de manejo e proteção fitossanitária semelhantes ao milho, em um cultivo totalmente mecanizável, com uso dos mesmos maquinários normalmente adotados para cultivar outros alimentos (Almeida 2016; Picco *et al.* 2021).

Apesar das inúmeras vantagens, o sorgo ainda é pouco adotado, apresentando área plantada em torno de 830 mil ha, valor bem abaixo dos 18.700 mil hectares cultivados com milho (CONAB 2021). Os principais entraves para o aumento das áreas plantadas com sorgo são a competição com a cana-de-açúcar, principal cultura energética no país, e com o milho, visto que o sorgo apresenta a mesma época de semeadura que o milho, o qual, além de ser empregado na produção de bioenergia, é empregado também na alimentação humana e animal.

As cultivares de sorgo são agrupadas em quatro grupos de acordo com suas características morfológicas e aptidão, sendo estes: granífero (produção de grãos), forrageiros (alimentação animal, seja *in natura* ou como silagem), de duplo propósito (produção de grãos e alimentação animal), sacarino (produção de bioetanol) e biomassa (produção de energia) (Pinho *et al.* 2006; May; Silva; Santos 2013).

De modo geral, a cultura do sorgo apresenta composição e características favoráveis, o que

permite a utilização de materiais de qualquer um dos grupos – citados no parágrafo anterior –, seja *in natura* ou na forma silagem, para a produção de biogás. No entanto, recomenda-se o emprego de cultivares que apresentam maior índice de produção de biomassa, como é o caso dos tipos forrageiros (Giorda & Colazo 2018).

Deve-se salientar que, devido ao aumento das pesquisas e das iniciativas de produção de bioenergia a partir do sorgo, programas de melhoramento genético vêm desenvolvendo cultivares denominadas de sorgo biomassa, as quais têm ciclo curto e maior potencial de produção de biomassa quando comparadas às cultivares dos outros grupos, indicados, principalmente, para a produção de biogás e bioetanol (May; Silva; Santos 2013). Exemplo disso são as cultivares de sorgo biomassa desenvolvidas pelas Embrapa, como por exemplo a cultivar BRS 716, que apresenta produção de massa fresca entre 120 e 150 t ha⁻¹, alto teor de fibra e baixo teor de umidade (Torres 2014).

No que diz respeito ao rendimento de metano, Pazderů *et al.* (2014) atestaram valores variando entre 207 e 387 Nm³ t⁻¹. Em estudo semelhante, Mahmood & Honermeier (2012) compararam 5 variedades de sorgo, as quais tiveram produções de metano iguais a 232, 280, 282 e 387 (316 Nm³ t⁻¹). Esses resultados são satisfatórios e reforçam a viabilidade da utilização da cultura na produção de biogás, evidenciando a necessidade de pesquisas sobre o assunto.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado e conduzido na Fazenda Paiaguás, pertencente à SLC agrícola, situada no município de Diamantino, Mato Grosso, com coordenadas geográficas 14°04'47,92" de latitude Sul, 57°27'20,08" de longitude Oeste e altitude média de 620 metros. A fórmula climática, segundo a classificação proposta por Köppen, é Aw, tropical de savana, apresentando estação chuvosa no verão e seca no inverno. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C e precipitação média anual de 2.123 mm. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, sendo que na área arenosa o teor médio de argila é de 20% e no argiloso, de 60% (Embrapa 2013).

Para o experimento a campo, o delineamento experimental utilizado ocorreu em blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial de 6x2, sendo seis materiais (Milho P30S31; Sorgo forrageiro AGRI002E (boliviano); Sorgo forrageiro NUCOVER 100; Sorgo granífero NUGRAIN 430; Sorgo silagem AGROMEN AGN 10S20; e Sorgo silagem NUSIL 426) e dois tipos de solo (arenoso e argiloso). Os materiais foram escolhidos com base nas médias de produção de massa verde apresentadas pelos materiais.

A implantação do experimento foi realizada na primeira quinzena do mês de março de 2020, após a colheita da soja. Em seguida, foi realizada a adubação a lanço, de acordo com a análise química da fertilidade do solo e com a recomendação de Souza & Lobato (2004).

A semeadura das culturas foi realizada mecanicamente, com espaçamento entre fileiras de 0,45 m e regulagem de forma a se obter estande de 2,5 plantas m⁻¹ para o Milho P30S31; 5,4 plantas/m para o Sorgo forrageiro AGRI002E; 5,9 plantas m⁻¹ do Sorgo forrageiro NUCOVER 100; 8,1 plantas/m do Sorgo granífero NUGRAIN 430; 6,3 plantas m⁻¹ do Sorgo silagem

AGROMEN AGN 10S20; e 6,3 plantas m⁻¹ do Sorgo silagem NUSIL 426.

As unidades experimentais constituíram-se de 3,6 m de largura e 7,0 m de comprimento, totalizando 25,2 m² de área total, sendo avaliados 13,5 m² de área útil. Os tratos culturais e o manejo fitossanitários foram realizados de acordo com as necessidades de cada cultura, utilizando-se do monitoramento e do nível de controle para os insetos-praga e do limiar de dano econômico para as doenças. A adubação de cobertura foi feita de acordo com Souza & Lobato (2004).

A coleta da biomassa para avaliação foi realizada no ponto de maturidade fisiológica das culturas, determinado pelo teor de água nos grãos, entre 30 e 40% para o milho e 35 e 45% para os sorgos. A umidade dos grãos foi determinada por meio de um medidor de grãos modelo Motomco.

No ponto de maturidade fisiológica de cada cultura energética, foi amostrada a biomassa de dois pontos aleatórios de cada parcela, com o auxílio de um quadro de 1,0 x 1,0 m, totalizando 5,2 kg de biomassa fresca, sendo:

- 1,6 kg para avaliação *in natura*;
- 1,6 kg para avaliação do material ensilado;
- 2 kg para análise de composição química;

As plantas coletadas foram cortadas rentes ao solo, acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o laboratório para a determinação da massa fresca em balança de precisão. Em seguida, foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até atingir-se massa constante, quando se determinou a massa seca. Essas avaliações foram realizadas no Laboratório da Unemat, em Tangará da Serra/MT.

As partículas de material, para ambas as análises, foram cortadas em partículas de 0,5 a 1,5 cm (Figura 1), utilizando-se um triturador forrageiro.



Figura 2. Partículas vegetais (Autor, 2020).

As partículas *in natura* foram levadas diretamente para os biodigestores (Figura2), nos quais se avaliou a curva e persistência na produção de biogás.



Figura 3. Biodigestor de batelada para escala laboratorial (Autor, 2020).

Já as partículas ensiladas foram acondicionadas em silos de laboratório, compactadas com um êmbolo para a expulsão do ar e mantidas hermeticamente fechadas durante 33 dias (Figura 3).



Figura 4. Silo de laboratório (Autor, 2020).

Os silos de laboratório são confeccionados com tubos de PVC e apresentam válvula do tipo Bunsen para o escape dos gases. Essas análises foram realizadas com as espécies cultivadas em ambos os solos estudados.

O processo de digestão anaeróbia da biomassa triturada *in natura* e da biomassa ensilada após 33 dias foi realizado por meio de 48 biodigestores de bancada – escala laboratorial (6 culturas x 4 repetições x 2 ambientes – solo arenoso e argiloso). O processo foi feito em duas etapas – *in natura* e ensilada –, operando em batelada, com reatores e gasômetros construídos com tubos de policloreto de vinila, de acordo com o método descrito em detalhes por Almeida (2016) e por Inoue (2008). Cada reator recebeu 0,4 kg de biomassa e 3 l de água. O inóculo utilizado como ponto de partida foi constituído de dejetos bovinos estabilizados, na concentração de 1,7 % (v/v).

Para o experimento em laboratório, utilizou-se delineamento inteiramente aleatorizado. As variáveis respostas avaliadas foram: produção de massa fresca (MF) e massa seca (MS),

ambas apresentadas em t/ha; proporção entre massa fresca e massa seca (MF/MS); e a porcentagem de proteína bruta, fibra bruta, extrato etéreo, matéria mineral e teor de massa seca. Além disso, foram avaliados, para o material *in natura* e material ensilado, o volume médio de biogás em $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$ e $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$, o volume total de biogás ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$), o pH inicial e pH final e a interação entre T ($^{\circ}\text{C}$) e volume de biogás.

A quantidade de MF e MS foram avaliadas através da pesagem de precisão. A variável MF/MS foi obtida por meio da razão de MF e MS. A porcentagem dos componentes químicos – proteína bruta, fibra bruta, extrato etéreo, matéria mineral e teor de massa seca – foram obtidos por análises laboratoriais.

O pH inicial e pH final, tanto do material *in natura* quanto do material ensilado, foi obtido através das partículas submetidas aos biodigestores (Figs. 2 e 3). A correlação entre T ($^{\circ}\text{C}$) e volume de biogás foi feita utilizando-se a temperatura diária média obtida nos 33 dias de produção de volume de biogás (15/06 a 17/07).

Os dados experimentais foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade e a homocedasticidade dos dados experimentais. Comprovando tais aspectos, posteriormente, seguiu-se com a análise de variância, através da aplicação do teste F, com o intuito de verificar a existência ou não de efeito de tratamento sobre as variáveis avaliadas no experimento. Para comparação de médias de tratamentos, fez-se uso do teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Os dados de temperatura e produção média de biogás também foram submetidos à análise de regressão para ajuste de modelos. O pacote estatístico empregado para a realização das análises estatísticas foi o SISVAR (Ferreira 2011).

Os custos de produção foram calculados com base nos custos de implantação e condução por hectare da lavoura de milho, utilizando-se esses mesmos valores para os materiais de sorgo, devido às similaridades no manejo das culturas. Os custos foram convertidos em dólares, tendo em vista a cotação de março de 2020, e divididos pelo volume de produção de biogás (em Nm^3

ha⁻¹) dos materiais *in natura* e ensilados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análises de variância

Verificou-se, através do teste de Shapiro-Wilk, tendência de normalidade para os dados dos componentes bromatológicos: MF/MS, VM, proteína bruta, fibra bruta, matéria mineral, volume total de gás e a correlação entre T (°C) e biogás. As demais variáveis, por não apresentarem distribuição normal, foram submetidas à transformação de dados por raiz quadrada.

Em relação aos resultados de análise de variância, observa-se que houve efeito significativo da fonte de variação solo sobre as seguintes variáveis: MF, MS, proteína bruta, fibra bruta, matéria mineral, teor de MS, pH inicial (*in natura*), VMHa (*in natura*), pH final (ensilado), VM (ensilado) e VMHa (ensilado).

Para a fonte de variação cultivar, foi observada diferença para os seguintes componentes: MF, MS, proteína bruta, fibra bruta, matéria mineral, teor de MS, pH final (*in natura*), VM (*in natura*), VMHa (*in natura*), VT (*in natura*), pH final, VM (ensilado) e VMHa (ensilado).

Ocorreu interação solo x cultivar (S x C) para as variáveis proteína bruta, fibra bruta, extrato etéreo, matéria mineral, teor de MS, pH final (*in natura*), pH final (ensilado), VM (ensilado), VMHa (*in natura*), VT (ensilado).

5.2. Massa fresca, massa seca e razão entre massa fresca e massa seca

Pelo teste Tukey, pode-se observar que a maioria das cultivares conduzidas em solo argiloso apresentaram maior produção de massa fresca (MF). Em solo arenoso, não foram verificadas diferenças de MF entre os materiais. Já em solo argiloso, o material Sorgo NUSIL 426 foi o que apresentou maiores valores de MF, diferindo estatisticamente apenas do Sorgo AGRI002E (Tabela 1).

Os resultados que indicam maior produção de MF em solo argiloso corroboram os resultados de Oliveira et al. (2020), cujo estudo demonstrou superioridade na produção de massa verde de milho e de braquiária quando cultivados em solo argiloso. E corroboram também os resultados de Ceccon *et al.* (2018), no qual verificou-se que a produção de massa verde de cultivares de sorgo sacarino em diferentes épocas de semeadura foi superior no cultivo em solo argiloso, independentemente da época de semeadura.

Tabela 1. Massa fresca ($t\ ha^{-1}$) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	40,98 Aa	51,07 Ab	46,02
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	45,19 Ba	82,52 Aab	63,85
Sorgo NUGRAIN 430	55,92 Aa	74,82 Aab	65,37
Sorgo NUSIL 426	41,56 Ba	94,15 Aa	67,85
Sorgo NUCOVER 100	58,50 Ba	81,96 Aab	70,23
Milho P30S31	67,83 Ba	86,55 Aa	77,19
Média	51,66	78,51	65,08

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Isso pode estar associado ao fato de que os solos argilosos apresentam maior proporção de partículas argila, que possuem tamanho menor que 0,005 mm e apresentam maior quantidade de cargas negativas, as quais se refletem numa maior capacidade de troca catiônica (CTC) e,

consequentemente, na maior retenção de nutrientes. Além disso, esses solos possuem maior microporosidade e, por isso, maior capacidade de retenção de água. Eles também são mais estruturados, o que garante melhor infiltração da água, aeração e espaço para desenvolvimento das raízes. Todos esses fatores contribuem para a melhor absorção de água e nutrientes, fatores essenciais ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas.

De maneira geral, as maiores produtividades de massa verde para o milho encontradas na literatura flutuam entre 30 e 45 t ha⁻¹ (Soares *et al.* 2017). Porém, Paziani *et al.* (2009) e Pazderû *et al.* (2014) alcançaram maiores valores de produtividade, atingindo produção média de massa verde de 50,47 t ha⁻¹ e 50,05 t ha⁻¹, respectivamente, assim como no presente estudo, cujas produtividades de massa verde para o material Milho P30S31 foram superiores à 45 t ha⁻¹, independentemente do tipo de solo. Além disso, os valores de MF observados são próximos aos verificados em outros estudos brasileiros, os quais verificam elevados valores de produção de massa verde, próximos a 70 t ha⁻¹ (Severo 2021; Patzlaff *et al.* 2020).

No que diz respeito à produção de massa verde apresentada pelos híbridos de sorgo, a maioria dos valores dentro dos limites frequentemente citados na literatura variam de 50 a 100 t ha⁻¹ (Pazderû *et al.* 2014). As médias gerais assemelham-se às obtidas por André (2021), em estudo no qual foi avaliado o desempenho agrônômico de genótipos de sorgo biomassa cultivados em distintas regiões do estado de Mato Grosso. Foram verificados valores médios de 68,6 t ha⁻¹ para Cáceres-MT, 75,8 t ha⁻¹ para Nova Xavantina e 73,2 t ha⁻¹ para Sinop-MT. No entanto, existem registros de materiais como a cultivar BRS 716, que apresenta produção de massa fresca entre 120 e 150 t ha⁻¹, alto teor de fibra e baixo teor de umidade (Torres 2014).

A mensuração da MF é muito importante pelo fator de que a carga dos biodigestores é realizada com base no peso fresco do substrato. Portanto, conhecendo o rendimento de MF de determinado material, pode-se estimar a área de cultivo necessária para a produção de MF, a fim de suprimir uma planta de biogás, por exemplo. Além disso, associada a outros fatores, a

umidade é um parâmetro que influencia a produção de biogás. Um alto teor de umidade geralmente facilita a digestão anaeróbica, visto que altos índices de água dissolvem a matéria orgânica facilmente degradável. No entanto, quanto menos água for adicionada ao processo, menor o volume ocupado no digestor e, conseqüentemente, menores serão os custos de investimento. Portanto, conhecer o conteúdo de água necessária no material é essencial para otimização do processo (Domingues 2020).

Assim como verificado para a variável MF, os valores de massa seca (MS) dos materiais Sorgo NUSIL 426 e Sorgo NUCOVER 100, quando cultivados em solo argiloso, foram superiores e significativos em comparação com aqueles cultivados em solo arenoso (Tabela 2). Esses resultados corroboram os resultados de Oliveira *et al.* (2020) e, conforme discutido anteriormente, estão associados com as melhores condições químicas e físicas geralmente apresentadas por solo argilosos, as quais favorecem o crescimento das plantas. Apesar do tipo de solo, não foram verificadas diferenças estatísticas entre os materiais estudados para esta variável (Tabela 2).

Tabela 2. Massa seca ($t\ ha^{-1}$) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	16,67 Aa	22,01 Aa	19,34
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	23,73 Aa	35,46 Aa	29,59
Sorgo NUGRAIN 430	26,83 Aa	35,21 Aa	31,02
Sorgo NUSIL 426	21,61 Ba	40,81 Aa	31,21
Sorgo NUCOVER 100	24,04 Ba	40,61 Aa	32,32
Milho P30S31	30,46 Aa	39,00 Aa	34,73
Média	23,89	35,51	29,70

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Para a cultura do milho, os valores de massa seca produzidos geralmente se encontram entre 13 e 23 $t\ ha^{-1}$ de matéria seca (Wünsch *et al.* 2012). No entanto, no presente estudo, o

material Milho P30S31 apresentou valores de MS superiores aos citados na literatura, até mesmo quando cultivado em solo arenoso, que atingiu produção de 30,46 t ha⁻¹. Esses resultados divergem daqueles encontrados por Severo (2021), o qual, ao avaliar três híbridos de milho, encontrou valores inferiores de MS, sendo estes 18,73 t ha⁻¹, 19,82 t ha⁻¹ e 20,88 t ha⁻¹.

O sorgo apresenta valores de MS superiores aos do milho, encontrando-se, geralmente, entre 30 e 40 t ha⁻¹ (André 2021). A superioridade do sorgo está associada, principalmente, à sua alta eficiência no uso de água e nitrogênio, o que permite seu desenvolvimento mesmo em condições nas quais o suprimento desses elementos é reduzido (Amaducci *et al.* 2020).

No estudo em questão, verificou-se que, em solo arenoso, a produção de MS apresentada pelos materiais de sorgo obteve valores inferiores a aqueles, mas, quando cultivadas em solo argiloso, as médias estiveram entre 35,21 e 40,81 t ha⁻¹, corroborando os resultados de André (2021), cujo estudo demonstrou produções variando entre 32,218 t ha⁻¹ e 45,506 t ha⁻¹.

A massa seca é um dos fatores relacionados à matéria-prima que influenciam no potencial de produção de biogás a partir de materiais lignocelulósicos. Isso porque a massa seca representa a fração da biomassa composta por substâncias que são efetivamente digeridas durante a biodigestão (Petravić-Tominac *et al.* 2020). Por esse motivo, materiais com maiores valores de MS são preferidos quando se visa à produção da biogás.

Não foi observado efeito estatístico de nenhuma das fontes de variação, a nível de 5% de probabilidade, sobre a variável relação entre massa fresca e seca (MF/MS) (Tabela 3).

Tabela 3. Relação entre massa fresca e massa seca de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	0,41 Aa	0,43 Aa	0,42
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	0,52 Aa	0,43 Aa	0,47
Sorgo NUGRAIN 430	0,48 Aa	0,48 Aa	0,48
Sorgo NUSIL 426	0,52 Aa	0,43 Aa	0,47
Sorgo NUCOVER 100	0,42 Aa	0,50 Aa	0,46
Milho P30S31	0,45 Aa	0,45 Aa	0,45
Média	0,46	0,45	0,46

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.3. Características químicas

A nível de 5% de significância, constata-se que as cultivares Sorgo AGRI002E e Sorgo AGROMEN AGN 10S20 geraram maior porcentagem de proteína bruta (PB) quando implementadas em solo arenoso. Inversamente, a cultivar Sorgo NUGRAIN 430 produziu maiores valores de PB quando conduzida em solo argiloso. Nesse solo, a cultivar AGROMEN AGN 10S20 foi estatisticamente equivalente à Sorgo NUSIL 426 e NUGRAIN 430 e ao material de milho e superior às demais. Já em solo arenoso, a AGROMEN AGN 10S20 foi equivalente ao Sorgo NUSIL 426 e superior às demais (Tabela 4).

Os valores de PB verificados para o material Milho P30S31 encontram-se abaixo dos determinados para a maioria dos materiais estudados por Cantarelli *et al.* (2007) e Patzlaff *et al.* (2020), os quais apresentaram valores próximos à 9,0% de PB. No entanto, os presentes valores são semelhantes aos valores máximos encontrados por Neumann *et al.* (2017), ao avaliarem a produção de milho para silagem em diferentes níveis de adubação nitrogenada, os quais foram iguais a 7,21% e 7,49%, para os níveis de 337,5 e 450,0 kg de N ha⁻¹, respectivamente, e ao valor de 7,97% estabelecido para a cultivar AGN30A95H em estudo de Buso *et al.* (2018).

Tabela 4. Proteína bruta (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	7,98 Ab	6,73 Bc	7,35
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	9,05 Aa	8,38 Ba	8,71
Sorgo NUGRAIN 430	7,38 Bb	8,08 Aab	7,73
Sorgo NUSIL 426	8,10 Aab	7,88 Aab	7,99
Sorgo NUCOVER 100	7,70 Ab	7,13 Abc	7,41
Milho P30S31	7,88 Ab	7,80 Aab	7,84
Média	8,01	7,66	7,84

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

A maioria dos híbridos de sorgo apresentaram valores de proteína bruta que variaram de 6,73 a 9,05%, com média de 7,8%. Tais resultados condizem com os registros encontrados na literatura, segundo os quais o sorgo apresenta valores médios de proteína bruta (cerca de 8% de PB) e corroboram os estudos de Costa *et al.* (2020), cujos valores de PB para a cultivar de sorgo CV. SS-318 estiveram próximos a 7,7%. No entanto, esses valores são superiores aos verificados por Oliveira *et al.* (2018), cuja média obtida foi de 5,82%.

A PB é um fator nutricional de extrema importância na alimentação animal, uma vez que ela é indispensável para o crescimento, reprodução e produção animal e corresponde ao componente mais caro da ração animal. Alimentos com teores de PB superiores a 7% são considerados adequados para alimentação animal, o que evidencia a possibilidade de utilização dos materiais estudados na alimentação animal ou duplo propósito (Faria *et al.* 2021).

O milho é a principal fonte de PB das rações animais (Clarindo *et al.* 2008), mas o sorgo apresenta importância cada vez maior, pois tem valor nutritivo equiparado ao milho e com a principal vantagem de menor custo de produção, uma vez que a produtividade de biomassa do sorgo é maior do que a do milho (Santin *et al.* 2020).

Na comparação entre médias, pode-se observar que a cultivar Sorgo AGROMEN AGN

10S20, quando implementada em solo arenoso, apresentou maior produção de FB ao ser comparada aos demais materiais. Os demais materiais apresentaram maior porcentagem quando conduzidas em solo argiloso, com exceção do Milho P30S31, que apresentou valores equivalentes em ambos os ambientes (Tabela 5).

Tabela 5. Fibra bruta (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	37,50 Bb	44,83 Aa	41,16
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	41,18 Aa	33,30 Bc	37,24
Sorgo NUGRAIN 430	21,83 Bc	28,38 Ad	25,10
Sorgo NUSIL 426	11,38 Be	30,15 Acd	20,76
Sorgo NUCOVER 100	17,25 Bd	39,98 Ab	28,61
Milho P30S31	24,48 Ac	24,58 Ae	24,53
Média	25,60	33,53	29,57

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O material Milho P30S31, quando cultivado em solo arenoso, esteve entre os materiais com menores valores de FB. E em solo argiloso, apresentou o menor valor de FB dentre todos os materiais. Esses valores são semelhantes aos verificados por Faria *et al.* (2021), cujos valores de FB apresentaram média de 24%, mas são menores do que os encontrados por Peres *et al.* (2020), cujos materiais genéticos estudados demonstraram FB variando entre 25,37% e 30,89%.

Os materiais que apresentaram maiores médias para FB foram o Sorgo AGROMEN AGN 10S20 cultivado em solo arenoso e o Sorgo AGRI002E cultivado em solo argiloso (Tabela5), os quais apresentaram 41,18% e 44,83% de FB, respectivamente. Esses valores são superiores aos registrados na literatura. Em estudo de Castro *et al.* (2015), foram verificados valores médios de FB de 36,6% para os híbridos estudados. Os valores encontrados no presente trabalho também são superiores aos encontrados por Neumann *et al.* (2004), cujo trabalho demonstrou, para os híbridos estudados, valores de FB variando de 27,17% a 31,50%.

Em relação às cultivares, quanto aos teores de extrato etéreo (EE), verifica-se que, em solo arenoso, a Sorgo NUCOVER 100 foi estatisticamente superior à cultivar Sorgo NUGRAIN 430 e à Sorgo NUSIL 426, não diferindo estaticamente das demais (Tabela 6). Em solo argiloso, não foram verificadas diferenças entre os materiais estudados.

Em pesquisa realizada por Patzlaff *et al.* (2020), o extrato etéreo de diferentes variedades de milho cultivados em dois espaçamentos apresentaram valores entre 1,71 a 1,97%, valores próximos aos verificados no presente estudo. No entanto, os valores do presente trabalho são inferiores aos verificados por Faria *et al.* (2021), cuja menor média de EE para silagens de milho foi de 2,2%.

Os valores de EE verificados para os híbridos de sorgo são inferiores aos constatados por Costa *et al.* (2020). No entanto, os valores do presente trabalho são superiores aos constatados para o híbrido AGX-213, mas inferiores aos constatados para o híbrido AG-2002, em estudo de Neumann *et al.* (2004).

Tabela 6. Extrato etéreo (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	1,13 Aab	1,30 Aa	1,21
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	1,30 Aab	1,18 Aa	1,24
Sorgo NUGRAIN 430	1,08 Ab	1,28 Aa	1,18
Sorgo NUSIL 426	1,05 Ab	1,13 Aa	1,09
Sorgo NUCOVER 100	1,40 Aa	1,23 Aa	1,31
Milho P30S31	1,20 Aab	1,08 Aa	1,14
Média	1,19	1,20	1,19

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade, constata-se que as cultivares Sorgo NUGRAIN 430 e AGROMEN AGN 10S20, quando conduzidas em solo argiloso, proporcionaram maior produção de matéria mineral (MM) em comparação aos outros materiais.

Em solo arenoso, a cultivar Sorgo AGRI002E apresentou maior média de MM, sendo estatisticamente superior ao Sorgo NUCOVER 100 e AGROMEN AGN 10S20 (Tabela 7).

As médias de MM verificadas para o material Milho P30S31 foram de 4,38 e 4,35%, valores superiores aos verificados por Neumann *et al.* (2017) e por Pereira *et al.* (2018), mas inferiores aos constatados por Faria *et al.* (2021), que encontraram valores de MM variando entre 5,6 e 6,4 para silagem de milho.

Para os materiais de sorgo, os valores de MM variaram de 3,48%, apresentado pelo material Sorgo AGROMEN AGN 10S20 cultivado em solo arenoso, a 6,23%, demonstrado pelo material Sorgo NUGRAIN 430 cultivado em solo argiloso. Os valores condizem com os registrados na literatura, que variam de 3,80% a 6,47% (Oliveira *et al.* 2018; Costa *et al.* 2020; Santin *et al.* 2020).

Tabela 7. Matéria mineral (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	5,30 Aa	4,73 Ab	5,01
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	3,48 Bc	5,23 Aab	4,35
Sorgo NUGRAIN 430	4,90 Ba	6,23 Aa	5,56
Sorgo NUSIL 426	4,58 Aab	4,70 Ab	4,64
Sorgo NUCOVER 100	3,63 Bbc	4,98 Ab	4,30
Milho P30S31	4,38 Aabc	4,33 Ab	4,35
Média	4,38	5,03	4,70

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na comparação entre médias, verifica-se que as cultivares Sorgo AGROMEN AGN 10S20, Sorgo NUSIL 426, Sorgo NUCOVER e Milho P30S31 geraram maiores médias de teor de matéria seca quando conduzidas em solo argiloso. Entre as cultivares, nota-se que a Sorgo NUCOVER 100 acarretou maiores porcentagens de TMS, independentemente do tipo de solo (Tabela 8).

Tabela 8. Teor de MS (%) de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	29,55 Ae	33,00 Ac	31,28
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	46,43 Abc	32,93 Bc	39,68
Sorgo NUGRAIN 430	35,08 Ade	36,75 Abc	35,91
Sorgo NUSIL 426	49,88 Ab	41,83 Bab	45,85
Sorgo NUCOVER 100	67,70 Aa	44,55 Ba	56,13
Milho P30S31	40,88 Acd	34,73 Bc	37,80
Média	44,92	37,30	41,11

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores de TMS encontrados para o material Milho P30S31 são semelhantes aos encontrados na literatura. Em estudo de Buso *et al.* (2018), verificaram-se valores de teores de MS variando de 31,38% a 35,25%, os quais são semelhantes ao que verificaram Pazderû *et al.* (2014) e Samarappuli & Berti (2018). Já em estudo de Neumann *et al.* (2017), foram encontrados teores de MS de até 43,4% e, em estudo de Faria *et al.* (2021), os teores de MS variaram de 28,8 a 42,9%.

Para os híbridos de sorgo, foram verificados teores de MS variando de 29,55% a 67,70%, sendo que a maioria dos híbridos apresentou teores de MS superiores aos frequentemente observados para a cultura. Em estudo de Pazderû *et al.* (2014), diferentes híbridos de sorgo apresentaram teores MS de 23,93; 26,48 e 31,34%. Já em pesquisa de Oliveira *et al.* (2018), para cultivares de sorgo adubadas com diferentes doses de N, constataram-se teores de MS de 26,76% e 31,33%.

A quantificação dos valores de MM, TMES, PB, EE e FB são essenciais para caracterização do substrato, uma vez que a composição desse último é um dos fatores preponderantes para determinação da composição do biogás e rendimento do processo de biodigestão anaeróbica.

De modo geral, substratos com maiores teores de carboidratos, proteínas e lipídeos

apresentariam maiores rendimentos de biogás, uma vez que, havendo maior quantidade dessas substâncias complexas para realização de hidrólise, maiores seriam as produções açúcares, ácidos graxos e aminoácidos para a etapa de acidogênese e assim sucessivamente.

Entretanto, a composição do substrato também influencia outros fatores, tal como o tempo de hidrólise. A degradação de proteínas, por exemplo, é muito complexa em comparação com outras substâncias (Dornack 2012). Portanto, enquanto a digestão de carboidratos inicia-se em poucas horas, a digestão de proteínas só vai acontecer após alguns dias (Rabelo, 2019). Sendo assim, a utilização de materiais com maiores teores de proteína bruta (PB) pode retardar o processo de biodigestão.

Assim como as proteínas, os lipídeos apresentam processo de hidrólise mais complexo do que os carboidratos. No entanto, de acordo com Perucci & Rodrigues (2018), gorduras digestíveis são os substratos com maior capacidade de produção de biogás. Sendo assim, uma vez que o extrato etéreo (EE) quantifica o teor de lipídeos em plantas, materiais com maiores teores de EE seriam mais vantajosos. No entanto, de acordo com Domingues (2020), altas concentrações de lipídeos podem criar problemas nos digestores anaeróbios, devido a uma possível concentração de amônia e ácidos graxos de cadeia longa (AGCL), resultando na inibição dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbica.

Os AGCL são os principais subprodutos do processo de degradação dos lipídeos, sendo convertidos em H_2 e acetato durante a acidogênese. No entanto, em elevadas concentrações, podem formar uma proteção no substrato, impedindo o acesso pelas bactérias e inibindo, assim, a produção de biogás, além de resultarem numa diminuição do pH e de exercerem efeito nocivo na membrana celular dos microrganismos metanogênicos, o que inibe a sua atividade (Lopes 2017). Já a amônia, produzida em função da digestão de N, quando presente em elevadas quantidades (acima de 3000 mg L^{-1}), pode afetar a atividade na metanogênese, já que é tóxica para os organismos metanogênicos (Domingues 2020).

No caso de resíduos lignocelulósicos, os quais são compostos principalmente por celulose, lignina e a hemicelulose, ocorre também a degradação desses compostos. No entanto, essa fração não é completamente digerida (Rabelo 2019). Isso porque celulose, hemicelulose e lignina formam um complexo lignocelulósico resistente ao ataque enzimático e/ou microbiano, sendo esse um fator limitante da biodigestão de materiais vegetais (Rodrigues 2009). Dessa forma, uma vez que o teor de fibra bruta expressa os teores de celulose, hemicelulose e lignina, estima-se que materiais com valores elevados de FB tendem a apresentar menores rendimentos de biogás.

5.4. pH

A nível de 5% de significância constata-se que não houve diferença estatística entre os materiais para os valores de pH inicial do material *in natura*, havendo diferenças apenas para o fator de variação “tipo de solo” para os materiais Sorgo AGROMEN AGN 10S20 e Milho P30S31. Em ambos os casos, foram verificados maiores valores de pH inicial quando cultivados em solo arenoso (Tabela 9). Tais valores são superiores aos verificados por Patzlaff *et al.* (2020), que, ao avaliarem o pH de material *in natura* proveniente de diferentes híbridos de milho, obtiveram médias próximas a 3,6.

Para o material ensilado, não foi observado efeito estatístico de nenhuma das fontes de variação, a nível de 5% de probabilidade, sobre a variável pH inicial (Tabela 10). As médias apresentadas por todos os materiais encontravam-se próximas a 4,5, sendo superiores aos valores encontrados para a cultura do milho, os quais mantêm-se abaixo de 4,0 (Rosa *et al.* 2004; Buso *et al.* 2018).

Tabela 9. pH inicial obtido a partir do material *in natura* de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	5,77 Aa	5,59 Aa	5,68
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	6,33 Aa	5,69 Ba	6,01
Sorgo NUGRAIN 430	5,99 Aa	6,06 Aa	6,03
Sorgo NUSIL 426	5,96 Aa	5,69 Aa	5,83
Sorgo NUCOVER 100	6,20 Aa	5,75 Aa	5,98
Milho P30S31	6,22 Aa	5,59 Ba	5,90
Média	6,08	5,73	5,90

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No que diz respeito aos híbridos de sorgo, os valores verificados são semelhantes aos constatados por Santin *et al.* (2020) para a silagem de sorgo sem aditivos e superiores aos verificados no ensaio de Neumann *et al.* (2004), cujos valores de pH para silagens de milho obtidas a partir de diferentes híbridos estiveram próximos de 3,5.

Tabela 10. pH inicial obtido a partir do material ensilado, de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	4,53 Aa	4,52 Aa	4,52
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	4,45 Aa	4,17 Aa	4,31
Sorgo NUGRAIN 430	4,26 Aa	4,26 Aa	4,26
Sorgo NUSIL 426	4,98 Aa	4,35 Aa	4,67
Sorgo NUCOVER 100	4,52 Aa	4,68 Aa	4,60
Milho P30S31	4,69 Aa	4,29 Aa	4,49
Média	4,57	4,38	4,47

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Veriato *et al.* (2018), valores de pH maiores que 4,5 em silagens de sorgo resultam em uma ampla variação de desenvolvimento de microrganismos, dentre eles, alguns patógenos, bolores e leveduras. Entretanto, com valores de pH abaixo desse valor (pH<4,0), limita-se o crescimento desses microrganismos, além do fato de não haver desenvolvimento do gênero *Clostridium*.

Em relação ao pH final apresentado pelo material *in natura*, não houve diferenças estatísticas quando se comparou os cultivos em solo arenoso e argiloso, com exceção do Sorgo NUCOVER 100, que apresentou maior valor de pH final quando conduzido em solo argiloso. Comparando-se as médias dos materiais cultivados em solo arenoso, não houve diferença estatística entre eles. Em solo argiloso, a Sorgo AGRI002E apresentou maior média de pH final, sendo estatisticamente superior à Sorgo AGROMEN AGN 10S20 e ao Milho P30S3 e equivalente às demais (Tabela 11).

Tabela 11. pH final obtido a partir do material *in natura* de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	4,53 Aa	4,75 Aa	4,64
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	4,38 Aa	4,14 Ac	4,26
Sorgo NUGRAIN 430	4,30 Aa	4,35 Aabc	4,33
Sorgo NUSIL 426	4,18 Aa	4,32 Aabc	4,25
Sorgo NUCOVER 100	4,23 Ba	4,63 Aab	4,43
Milho P30S31	4,50 Aa	4,22 Abc	4,36
Média	4,35	4,40	4,38

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os materiais ensilados, em relação aos tipos de solo, verifica-se que as cultivares Sorgo AGROMEN AGN 10S20 e Sorgo AGRI002E, quando implementadas em solo arenoso, resultaram em maiores valores de pH final. Além disso, entre as cultivares, foram as que apresentaram maiores médias de pH. Já no solo argiloso, as cultivares não diferiram estatisticamente quanto ao teor de pH final no material ensilado (Tabela 12).

Tanto os materiais *in natura* quanto os materiais ensilados apresentaram valores de pH final inferiores ao pH inicial, com exceção do material ensilado de Sorgo AGROMEN AGN 10S20 cultivado em solo arenoso. Esse fato pode ser explicado porque, durante o processo de biodigestão, ocorre a fase de acidogênese e também a formação de ácido acético na fase de

acetogênese, que contribuem para a redução do pH do sistema (Michalska & Ledakowicz, 2013; Soares; Feiden; Tavares, 2017; Zhao *et al.* 2020).

Tabela 12. pH final obtido a partir do material ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	4,46 Aab	3,94 Ba	4,20
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	4,68 Aa	4,15 Ba	4,42
Sorgo NUGRAIN 430	3,85 Ac	3,98 Aa	3,92
Sorgo NUSIL 426	4,13 Abc	3,98 Aa	4,05
Sorgo NUCOVER 100	4,20 Abc	4,10 Aa	4,15
Milho P30S31	3,97 Ac	4,01 Aa	3,99
Média	4,21	4,03	4,12

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O pH é um dos principais fatores que influenciam no desempenho da digestão anaeróbia, uma vez que afeta a sobrevivência e a atividade dos microrganismos envolvidos na biodigestão. Por esse motivo, recomenda-se que a digestão anaeróbica nos sistemas de produção de biogás seja realizada em pH entre 6,5 e 8,5, sendo o pH ótimo entre 7,0 – 8,0 (Petračić-Tominac *et al.* 2020). De acordo com Domingues (2020), a manutenção desses valores ao longo do processo de biodigestão pode ser realizada por meio da utilização de agentes tampão como o hidrogenocarbonato de sódio, hidróxido de sódio, carbonato de sódio e sulfureto de sódio.

5.5. Produção de biogás

Não foi verificada diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% para a produção de biogás a partir do material *in natura*, sendo, portanto, a produção de biogás não influenciada pelos cultivares e os ambientes de cultivo (Tabela 13).

Tabela 13. Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{t}^{-1}$) obtido a partir do material *in natura* de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	1,28 Aa	1,12 Aa	1,20
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	1,35 Aa	2,13 Aa	1,74
Sorgo NUGRAIN 430	2,45 Aa	2,16 Aa	2,30
Sorgo NUSIL 426	2,14 Aa	1,99 Aa	2,06
Sorgo NUCOVER 100	1,92 Aa	1,30 Aa	1,61
Milho P30S31	2,14 Aa	1,66 Aa	1,90
Média	1,88	1,73	1,80

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A nível de 5% de significância, constata-se que a cultivar Sorgo NUCOVER 100 gerou maior produção de gás em $\text{Nm}^3 \text{t}^{-1}$ do material ensilado, quando implementada em solo arenoso. Entre as cultivares, em solo arenoso, a Sorgo NUSIL 426 apresentou maior média, embora não tenha diferido das demais. Em solo argiloso, por sua vez, a cultivar com maior média de VM foi a Sorgo NUGRAIN 430, a qual diferenciou-se do material Sorgo AGRI002E (Tabela 14).

Tabela 14. Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{t}^{-1}$) obtido a partir do ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	1,40 Aa	0,89 Ab	1,15
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	1,41 Aa	1,78 Aab	1,60
Sorgo NUGRAIN 430	1,80 Aa	2,06 Aa	1,93
Sorgo NUSIL 426	2,05 Aa	1,32 Aab	1,68
Sorgo NUCOVER 100	1,98 Aa	1,22 Bab	1,60
Milho P30S31	1,36 Aa	1,93 Aab	1,64
Média	1,67	1,53	1,60

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Em relação à média de produção de biogás por hectare, verificou-se efeito significativo

para o fator “tipo de solo” para as cultivares Sorgo AGROMEN AGN 10S20 e Sorgo NUSIL 426, as quais mostraram-se mais produtivas em solo argiloso. Com respeito à comparação entre os diferentes materiais, o Milho P30S31 apresentou maior média de VMHa, diferindo-se estatisticamente do material Sorgo AGRI002E. Já para os materiais cultivados em solo argiloso, a maior média foi verificada para o material Sorgo NUSIL 426, o qual também diferenciou-se do material Sorgo AGRI002E (Tabela 15).

Tabela 15. Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$) obtido a partir do material *in natura* de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	52,03 Ab	56,47 Ab	54,25
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	60,24 Bab	176,21 Aa	118,22
Sorgo NUGRAIN 430	139,52 Aab	156,60 Aa	148,06
Sorgo NUSIL 426	90,63 Bab	187,45 Aa	139,04
Sorgo NUCOVER 100	109,87 Aab	106,75 Aab	108,31
Milho P30S31	146,61 Aa	140,81 Aab	143,71
Média	99,82	137,38	118,60

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pelo teste Tukey, pode-se observar, a 5% de probabilidade, que as cultivares Sorgo AGROMEN AGN 10S20 e Milho P30S31, quando conduzidas em solo argiloso, geraram maior produção de VMHa de material ensilado do que quando cultivadas em solo arenoso. No entanto, os diferentes materiais estudados apresentaram diferenças estatísticas somente quando cultivadas em solo argiloso. Nesse caso, os materiais Milho P30231, Sorgo NUGRAIN 430 e Sorgo AGROMEN AGN 10S20 apresentaram os maiores índices produtivos, diferindo-se do material Sorgo AGRI002E (Tabela 16).

Tabela 16. Volume médio de biogás ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$) obtido a partir do material ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	59,94 Aa	46,13 Ab	53,03
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	63,48 Ba	143,94 Aa	103,71
Sorgo NUGRAIN 430	102,64 Aa	144,60 Aa	123,62
Sorgo NUSIL 426	86,19 Aa	126,28 Aab	106,24
Sorgo NUCOVER 100	115,65 Aa	99,88 Aab	107,76
Milho P30S31	92,70 Ba	172,92 Aa	132,81
Média	86,77	122,29	104,53

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

A nível de 5 % de significância, constata-se que a produção total de gás do material *in natura* não diferiu quanto ao tipo de solo utilizado ou em relação ao material utilizado (Tabela 17).

Tabela 17. Volume total de biogás ($\text{Nm}^3 \text{t}^{-1}$) obtido a partir do material *in natura* de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	42,15 Aa	36,89 Aa	39,52
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	44,46 Aa	70,43 Aa	57,44
Sorgo NUGRAIN 430	80,80 Aa	71,11 Aa	75,96
Sorgo NUSIL 426	70,46 Aa	70,41 Aa	70,44
Sorgo NUCOVER 100	63,46 Aa	42,82 Aa	53,14
Milho P30S31	70,75 Aa	54,85 Aa	62,80
Média	62,01	57,75	59,88

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na comparação entre médias, pode-se observar que as cultivares Sorgo NUSIL 426 e Sorgo NUCOVER 100, quando implementadas em solo arenoso, resultaram em maior produção total de gás. Entre aquelas cultivadas em solo argiloso, a Sorgo NUGRAIN 430 gerou a maior

média, sendo estatisticamente superior à cultivar Sorgo AGRI002E e equivalente às demais. Não ocorreu diferença estatística entre as cultivares conduzidas em solo arenoso (Tabela 18).

Tabela 18. Volume total de biogás em $\text{Nm}^3 \text{t}^{-1}$ (VT) obtido a partir do material ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho implementadas em dois tipos de solo, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Solo		Média
	Arenoso	Argiloso	
Sorgo AGRI002E	46,36 Aa	29,52 Ab	37,94
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	46,51 Aa	58,70 Aab	52,60
Sorgo NUGRAIN 430	59,27 Aa	68,02 Aa	63,65
Sorgo NUSIL 426	67,48 Aa	43,39 Bab	55,44
Sorgo NUCOVER 100	65,61 Aa	40,36 Bab	52,99
Milho P30S31	44,44 Aa	63,58 Aab	54,01
Média	54,95	50,59	52,77

Médias de cultivares seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Todas as variáveis relacionadas à produção de biogás apresentaram valores inferiores aos verificados na literatura, tanto para a cultura do milho como para a cultura do sorgo.

Em estudo realizado por Pazderů *et al.* (2014), a média de produção de biogás a partir de milho *in natura* foi de $337,4 \text{ Nm}^3 \text{ t}^{-1}$. No entanto, esse valor é muito superior à maioria dos rendimentos registrados na literatura, os quais variam de 170 a $230 \text{ Nm}^3 \text{ t}^{-1}$ (Milanez *et al.* 2021).

Em pesquisa desenvolvida por Samarappuli & Berti (2018), verificaram-se produções de biogás de $14900 \text{ Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $16200 \text{ Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$ para o milho, o que condiz com os resultados do estudo de Oslaj, Mursec e Vindis (2010), no qual o híbrido de milho com maior produção de biogás atingiu índice de $16\,447.2 \text{ Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$. No entanto, esses valores são bastante superiores ao encontrado por Pazderů *et al.* (2014), no qual a produção de biogás a partir de milho atingiu $4307,50 \text{ Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$.

No que diz respeito à cultura do sorgo, Pazderů *et al.* (2014) verificaram, para diferentes materiais de sorgo, produções de biogás iguais a 358,58, 398,73 e $393,43 \text{ Nm}^3 \text{ t}^{-1}$. Já em estudo

de Mahmood & Honermeier (2012), foram verificadas médias de produção de biogás de 6809 Nm³ ha⁻¹ e 8,637 Nm³ ha⁻¹ de biogás, com destaque para a cultivar Goliath, quando cultivada em espaçamento de 75 cm, que produziu 10798 Nm³ ha⁻¹. Samarappuli & Berti (2018), por sua vez, verificaram produções totais de 16.400 e 12.400 Nm³ ha⁻¹ para materiais de sorgo. Já Pazderů *et al.* (2014) verificaram valores inferiores e iguais a 2.409,02, 4.098,52 e 4.967,46 Nm³ ha⁻¹ para os diferentes materiais estudados.

Tais resultados, provavelmente, se devem a baixas temperaturas ocorridas em alguns dias durante o período experimental. A temperatura exerce influência sobre o processo de biodigestão anaeróbica, sendo que, em temperaturas elevadas, as reações biológicas ocorrem com maior velocidade, resultando em maior eficiência do processo. Geralmente, o processo anaeróbio desenvolve-se em temperaturas mesófilas (30°C a 45°C) ou termófilas (45°C a 60°C) (Mata 2018; Petravić-Tominac *et al.* 2020). Tendo em vista que o local de realização do experimento não apresentava controle de temperatura, a média de produção de biogás pode ter sido menor nos dias mais frios.

5.6. Temperatura

O melhor ajuste dos dados de temperatura e produção média diária de biogás do material *in natura* foi verificado para o modelo quadrático ($R^2= 37\%$) (Figura 5), assim como para os dados de temperatura e a produção média diária de biogás do material ensilado (Figura 6).

As funções determinadas pela análise de regressão entre temperatura e produção diária indicam que, tanto para o material *in natura*, quanto para o material ensilado, as maiores produções foram verificadas em temperaturas entre 23 e 25 °C. Essas temperaturas estão abaixo do considerado ideal para ocorrência do processo de biodigestão, que são temperaturas entre 35 - 42 °C (condições mesófilas) ou 45 - 60 °C (condições termófilas) (Petravić-Tominac *et al.* 2020), o que também pode ter colaborado para os reduzidos índices de produção de

biogás verificados no presente estudo.

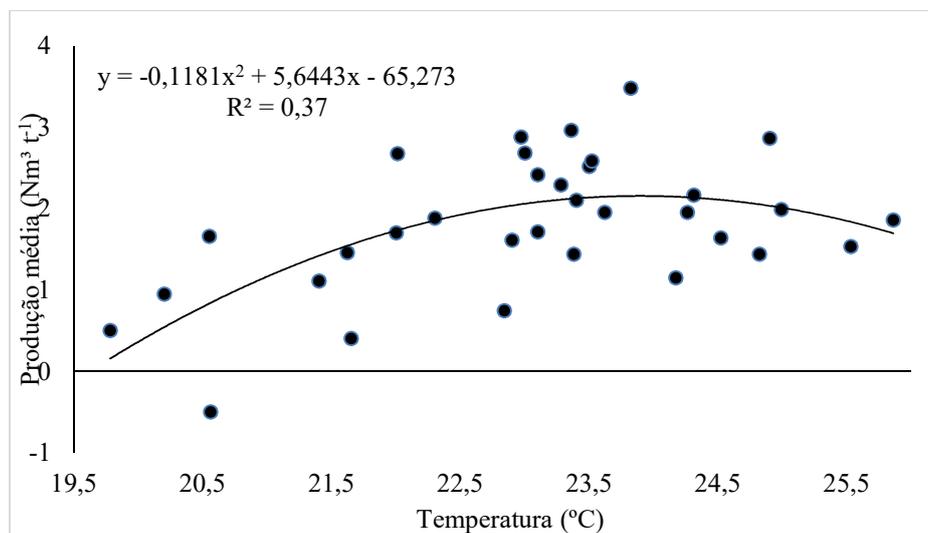


Figura 5. Modelo quadrático da produção média de biogás (Nm³ t⁻¹) obtida a partir do material *in natura*, em função da temperatura diária (°C), Diamantino, MT, 2020.

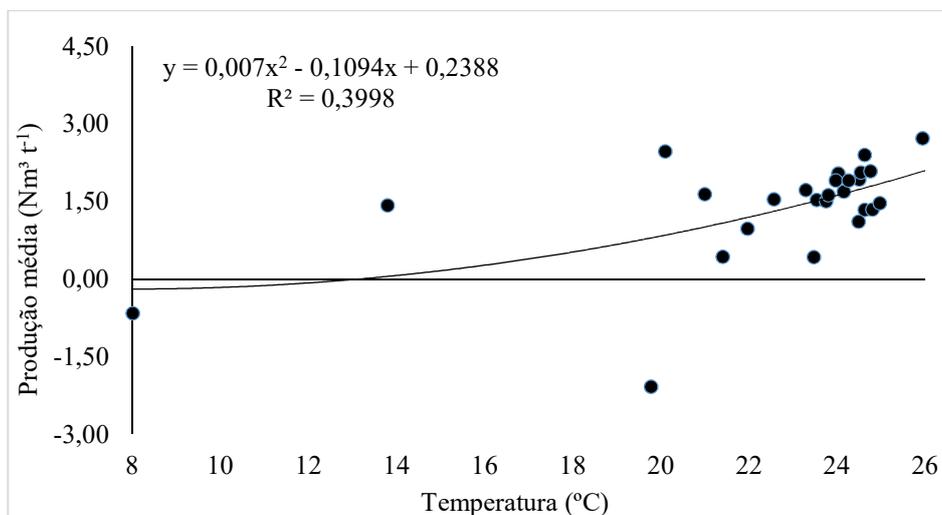


Figura 6. Modelo quadrático da produção média de biogás (Nm³ t⁻¹) obtida a partir do material ensilado, em função da temperatura diária (°C), Diamantino, MT, 2020.

5.7. Custos de produção

O custo médio de produção de biogás a partir de material *in natura* e ensilado das cinco cultivares de sorgo e da cultivar de milho foram estimados com base no custo médio de produção de um hectare de milho, o qual foi equivalente a R\$ 2.641,67 ha⁻¹. Tendo em vista que, em março de 2020, a cotação do dólar estava a um preço médio de R\$ 4,50, tem-se que o custo médio de produção das culturas foi de US\$ 587,00 ha⁻¹. Então, dividindo-se o custo de produção das culturas pela produção média de biogás por hectare, obteve-se o custo médio de produção de biogás a partir dos materiais de sorgo e milho, os quais estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19. Custo médio (US\$ Nm⁻³) de produção de biogás a partir de material *in natura* e ensilado de cinco cultivares de sorgo e uma cultivar de milho, Diamantino, MT, 2020.

Cultivar	Material	
	<i>In natura</i>	Ensilado
Sorgo AGRI002E	10,82	11,07
Sorgo AGROMEN AGN 10S20	4,97	5,66
Sorgo NUGRAIN 430	3,96	4,75
Sorgo NUSIL 426	4,22	5,53
Sorgo NUCOVER 100	5,42	5,45
Milho P30S31	4,08	4,42
Média	4,95	5,62

Os valores de custo médio de produção de biogás verificados no presente trabalho são maiores do que os verificados na literatura. Em estudo desenvolvido por Machado (2019), os valores de custo para a produção de biogás variaram de 1,16 (0,26 US\$ m⁻³) a 1,36 R\$ m⁻³ (0,30 US\$ m⁻³), valores inferiores aos verificados no presente estudo.

No entanto, deve-se considerar que o estudo em questão avaliou a produção de biogás em condições experimentais, diferentemente dos trabalhos apresentados na literatura, nos quais o custo é calculado com base na produção da planta de biogás. Além disso, o principal determinante do custo é a matéria-prima, sendo que, quando essa se trata de resíduos industriais

do agronegócio e/ou dejetos, os custos diminuem. Por outro lado, se são utilizadas plantações dedicadas a esse fim, como no presente estudo, o custo aumenta (Milanez *et al.* 2018).

Assim, deve-se levar em consideração que o cultivo de milho segunda safra é realizado após a safra de verão, época na qual as condições climáticas não são as mais favoráveis para o desenvolvimento da cultura. Com isso, os índices produtivos da cultura podem decair e, nas lavouras em que a cultura não é implementada, a terra em questão permanece sem uso até que se inicie o plantio de nova safra.

Portanto, o cultivo de milho para a produção de biogás nessa janela de plantio, além de evitar a ociosidade da terra, possibilitaria obtenção de renda. Além disso, o cultivo do sorgo em substituição ao milho poderia ser ainda mais vantajoso, devido à rusticidade da cultura que apresenta maior capacidade de desenvolvimento em condições menos favoráveis.

6. CONCLUSÕES

Maiores produções de biomassa fresca e seca foram observados quando cultivados em solo argiloso;

Os híbridos de sorgo apresentaram maior produção de biomassa fresca e seca, sendo mais indicados para a produção de biogás do que o material Milho P30S31;

Os materiais apresentaram características químicas adequadas para produção de biogás, embora a produção de biogás tenha sido baixa, o que pode estar associado a variações de temperatura;

Os tipos de solo influenciaram, principalmente, no crescimento e desenvolvimento das culturas, e, conseqüentemente, no acúmulo de biomassa fresca e seca, mas não apresentaram influência sobre as outras variáveis;

Os custos de produção do biogás variaram de acordo com os híbridos utilizados e com a forma do material (*in natura* ou ensilado).

7. REFERÊNCIAS

- Abad, P.M. 2015.** Valorização de resíduos agro-industriais por processos de digestão anaeróbia. Dissertação de Mestrado, UC, Coimbra, 86 p.
- ABIOGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. Biogás no Brasil: Conhecendo o Mercado no País.** Brasília, 2019. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/Infograficos_Abiogas_D_2021-1.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- Agência Internacional de Energia (AIE). 2012.** Energy Technology Perspectives 2012 - Pathways to a Clean Energy System. Disponível em: < <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2012>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- Agostini, A., F. Battini, M. Padella, J. Giuntoli, D. Baxter, L. Marelli & S. Amaducci. 2016.** Economics of GHG emissions mitigation via biogas production from Sorghum, maize and dairy farm manure digestion in the Po valley. *Biomass Bioenergy*, 89: 58-66.
- Almeida, C. 2016.** Potencial de produção de biogás a partir da biomassa de suinocultura com culturas energéticas. Dissertação de Mestrado, UNIOESTE, Cascavel, 100 p.
- Amaducci, S., M. Colauzzi, F. Battini, A. Fracasso & A. Perego. 2016.** Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and sorghum in a water limited environment. *EUR J AGRON*, 76: 54-65.
- Anderson, K., P. Sallis & S. Uyanik. 2003.** Anaerobic treatment processes. In: MARA, D.; HORAN, N. (Eds.) *The handbook of water and wastewater microbiology*. Academic Press, p. 391-396.
- André, V.L.S. 2021.** Desempenho agrônômico de genótipos de sorgo biomassa cultivados em distintas regiões do estado de Mato Grosso. Dissertação de Mestrado, UNEMAT, 41 p.
- Araújo, A.P.C. 2017.** Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Dissertação de Mestrado, UFU, 42 p.
- Arun, J., K.P. Gopinath, R. Sivaramakrishnan, N. Madhav, K. Abhishek, V.G.K. Ramanan & A. Pugazhendhi. 2021.** Bioenergy perspectives of cattails biomass cultivated from municipal wastewater via hydrothermal liquefaction and hydro-deoxygenation. *Fuel*, 284: 1-27.
- Barcelos, B.R. 2009.** Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, 89 p.
- Bender Filho, R. 2015.** Conta Petróleo e Balança Comercial Brasileira: Uma Análise do Período Recente. *Novos Estudos- Cebrap*, 101: 79-95.

Berti, M.T., D. Samarappuli, A. Aponte, O. Teuber, J. Lukaschewsky, D. Undersander & R.W. Gesch. 2015. Intercropping maize and forage sorghum for biogas production in the north central region, USA. In.: 23rd European Biomass Conference and Exhibition, 159-163.

Bitar, A.L. 2003. Mineralização e formação de gases da degradação de *Eichhornia azurea* Kunth e *Egeria najas* Planch. Tese de Doutorado, UFSC, São Carlos, 133 p.

Buso, W.H.D., A.S. Machado, T.B. Ribeiro & L.O. Silva. 2018. Produção e composição bromatológica da silagem de híbridos de milho sob duas alturas de corte. Journal Of Neotropical Agriculture, 5: 74-80.

Camargo, D.W.N. 2012. Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles em el departamento del Meta. Tecnura, 16: 142-156.

Cantarelli, V.S.; E.T. Fialho; R.V. Sousa; R.T.F. Freitas & J.A.F. Lima. 2007. Composição química, vitreosidade e digestibilidade de diferentes híbridos de milho para suínos. Ciênc. Agrotec., 31: 860-864.

Carvalho, D. 2009. Biocombustíveis - Os desafios do Brasil - Falta organizar a produção e a distribuição e diversificar fontes. Disponível em: <http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1248:reportagens-materias&Itemid=39>. Acesso em: 10 mar. 2021.

Castro, F.M.R., A.T. Bruzi, J.A.R. Nunes & R.A.C. Parrella. 2015. Potencial energético de genótipos de sorgo biomassa. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1023653/1/Potencialenergetico.pdf>>. Acesso em: 25 mai. 2021.

Ceccon, G.; P.A. Makino, V.B. Alves; R. Fachinelli & R.A. Luz. 2018. Produtividade de cultivares de sorgo sacarino em diferentes épocas de semeadura e tipos de solo. Journal Of Neotropical Agriculture, 5: 69-75.

Clarindo, R.L., F.A.P. Santos, C.M.M. Bittar, H. Imaizumi, N.V.A. Lima & E.M. Pereira. 2008. Avaliação de fontes energéticas e proteicas na dieta de bovinos confinados em fase de terminação. Ciênc. anim. bras., 9: 902-910.

Coelho, S.T. 2018. Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. São Paulo, IEE - USP. 218 p.

Coldebella, A., S.N.M. Anderson, J. Souza & A.C. Koheler. 2006. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. In Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006, Campinas (SP, Brazil).

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos - v.8 - Safra 2020/21, n.5 - Quinto levantamento, Brasília, p. 1-94, fevereiro 2021.

Cortez, L.A.B., E.S. Electo & E.O. Gómez, 2008. Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

Costa, A.S., C. P. Maia, D.P. Barbosa, A.K.V. Guimarães & M.L. Pontes. 2020. Composição bromatológica do sorgo cv. Ss-318 em monocultivo e em consórcio com soja, em dois espaçamentos. *Braz. J. Dev.*, 6: 75852-75862.

Costa, R.C. & C.P.T. Prates. 2005. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 27 p.

Dahunsi, S.O., A.T. Adesulu-Dahunsi, C.O. Osueke, A.I. Lawal, T.M.A. Olayanju, J.O. Ojediran & J.O. Izebere. 2019. Biogas generation from *Sorghum bicolor* stalk: effect of pretreatment methods and economic feasibility. *Energy Rep.*, 5: 584-593.

Delzeit, R., W. Britz & K. Holm-Müller. 2012. Modelling regional input markets with numerous processing plants: the case of green maize for biogas production in germany. *Environ Model Softw*, 32: 74-84.

Domingues, P.M.S.P. 2020. Produção de biogás por codigestão anaeróbia e sua valorização. Dissertação de Mestrado, IPEL, 142 p.

Dornack, C. 2012. Biogas production from organic waste and biomass - fundamentals and current situation. *J. Viet. Env.*, 3: 43-49.

Edrisi, S.A. & P.C. Abhilash. 2016. Exploring marginal and degraded lands for biomass and bioenergy production: an indian scenario. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 54: 1537-1551.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 3 ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE (Brasil). 2018. Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano Brasília Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 20 p.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE (Brasil). Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. 264 p.

Faria, T.F.R., F. Pinese, F.M.A. Gimenes, J.J.A.A. Demarchi, F.P. Campos, L.M. Premazzi, W.T. Mattos & L. Gerdes. 2021. Composição bromatológica de silagens de milho comerciais produzidas no Brasil. *Arch. de Zootec.*, 70: 20-27.

Ferraz, J.M.G. & I.E. Marriel. 1980. Biogás: uma fonte alternativa de energia. Sete Lagoas, Embrapa/CNPMS, 27p. (CNPMS-Circular Técnica, 3).

Ferreira, D.F. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciênc. agrotec.*, 35: 1039-1042.

Flores, R.A. 2009. Produção de capim elefante (*Pennisetum purpureum* schum.) para fins energéticos no cerrado: resposta a adubação nitrogenada e idade de corte. Dissertação de Mestrado, UFRRJ, Seropédica, 80 p.

Foss Analytics. 2018. Análise de fibras em rações animais Fibra bruta, fibra detergente neutra e fibra detergente ácida – as normas e as opções de automação. Disponível em: <<https://www.fossanalytics.com/-/media/files/documents/papers/laboratories-segment/ebook-fibre-analysis-of-animal-feed-br.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2021.

Galbiatti, J.A., A.D. Caramelo, F.G. Silva, E.A.B. Gerardi & D.A. Chiconato. 2010. Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. *Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambient.*, 14: 432–437.

Gelfand, I., R. Sahajpal, X. Zhang, R.C. Izaurralde, K. Gross & G.P. Robertson. 2013. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, 493: 514-517.

Giorda, L.M. & J.L. Colazo. 2018. Biomasa Energética de Sorgo en Ubajay (Entre Ríos). INTA Manfredi y el Sorgo: Nuevos Desarrollos. Disponível em: <<https://inta.gov.ar/documentos/biomasa-energetica-de-sorgo-en-ubajay-entre-rios-nuevos-desarrollos>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

Hartung, C., D. Andrade, V. Dandikas, T. Eickenscheidt, M. Drösler, C. Zollfrank & H. Heuwinkel. 2020. Suitability of paludiculture biomass as biogas substrate – biogas yield and long-term effects on anaerobic digestion. *Renew. Energy*, 159: 64-71.

Inoue, K.R.A. 2008. Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira. Dissertação de Mestrado, UFV, 92 p.

Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (IMEA). Custo de Produção - Milho - 19/20. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalle?c=3&s=3>>. Acesso em: 02 jul. 2019.

Januzzi, G.M. 2002. Energia e mudanças climáticas: barreiras e oportunidades para o Brasil. *ComCiência*, 34.

Jylhä, P. & D. Bergström. 2016. Productivity of harvesting dense birch stands for bioenergy. *BIOMASS BIOENERG*, 88: 142-151.

Koblenz, B., S. Tischer, J. Rücknagel & O. Christen. 2015. Influence of biogas digestate on density, biomass and community composition of earthworms. *IND CROP PROD*, 66: 206-209.

Losekann, L. & M.C.M. Hallack. 2018. Novas energias renováveis no Brasil: desafios e oportunidades. In: Negri, A., B.C. Araújo & R. Bacelette. *Novas energias renováveis no Brasil: desafios e oportunidades*. Brasília: Ipea, v. 2, 678 p.

Louzada, A.G. 2006. Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + BFs. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, 148 p.

Machado, A.R. 2019. Potencialidades e desafios da utilização de biogás para transporte e geração de energia. Trabalho de conclusão de curso, UFSM, 69 p.

Mahmood, A. & B. Honermeier. 2012. Chemical composition and methane yield of sorghum cultivars with contrasting row spacing. *Field Crops Res.*, 128: 27-33.

- May, A., D.D. Silva & F.C. Santos. 2013.** Cultivo do sorgo biomassa para cogeração de energia elétrica. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 65 p. (Documentos).
- Mendonça, E.F. 2009.** Tratamento anaeróbio de efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular. Dissertação de Mestrado, UNIOESTE, Cascavel, 62 p.
- Miah, M.D., M. Koike, M.Y. Shin & S. Akther. 2010.** Forest biomass and bioenergy production and the role of CDM in Bangladesh. *NEW FOREST*, 42: 63-84.
- Michalska, K. & S. Ledakowicz. 2013.** Alkali pre-treatment of Sorghum Moench for biogas production., *Chem. Pap.*, 67: 1130-1137.
- Milanez, A.Y., D.D. Guimarães, G.B.S.M., Maia, J.A.P. Souza & M.L.F. Lemos. 2018.** Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275.
- Milanez, A.Y., G.B.S.M., Maia & D.D. Guimarães. 2021.** Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 53, p. 177-216.
- Morris, R.L. 2011.** Relating Methanogen Community Structure to Function in Anaerobic Wastewater Digesters. Tese de Doutorado, Marquette University, Milwaukee, 161 p.
- Neumann, M. et al. 2017.** Características agronômicas do milho para silagem sob níveis de adubação nitrogenada e potássica em cobertura. *Sci. Agrar. Parana*, 16: 69–77.
- Neumann, M., J. Restle, J.L. Nörnberg, D.C. Alves Filho, R.O. Mello, A.N.M. Souza & L.G. Pellegrini. 2004.** Avaliação da qualidade e do valor nutritivo da silagem de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench). *Rev. bras. milho sorgo*, 3: 120-133.
- Oliveira, O.H.; D.P. Capristol, C.M.S. Giroletta & G. Ceccon. 2020.** Azospirillum brasilense em milho solteiro e consorciado com braquiária em solos arenoso e argiloso. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217783/1/3.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2021.
- Oslaj, M., B. Mursec & P. Vindis. 2010.** Biogas production from maize hybrids. *Biomass Bioenergy*, 34: 1538-1545.
- Ostovareh, S., K. Karimi & A. Zamani. 2015.** Efficient conversion of sweet sorghum stalks to biogas and ethanol using organosolv pretreatment. *IND CROP PROD*, 66: 170-177.
- Pazderů, K., J. Hodoval, J. Urban, J. Pulkrábek, V. Pačuta, & J. Adamčík. 2014.** The influence of sweet sorghum crop stand arrangement on biomass and biogas production. *Plant Soil Environ.*, 60: 433–438.
- Paziani, S.F.; A.P. Duarte; L.G. Nussio; P.B. Gallo; C.M.M. Bittar; M. Zopollatto & P.C. Reco. 2009.** Características agronômicas e bromatológicas de híbridos de milho para produção de silagem. *R. Bras. Zootec.*, 38, n. 3: 411-417.

Perecin, D. & A. Cargnelutti Filho. 2008. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. *Ciênc. Agrotec.*, 32: 68-72.

Peres, M.S., M.S. Maia, R.R. Valicheski, E.R. Carvalho, L.O. Xavier, B.C. Caires, E.M. Alves & F.V. Lellis. 2020. Qualidade nutricional e bromatológica da silagem de milho inoculado com azospirillum em cultivo solteiro e consorciado. *Braz. J. of Develop.*, 6: 85974-85988.

Pérez-Rodríguez, N.; D. García-Bernet & J.M. Domínguez. 2017. Extrusion and enzymatic hydrolysis as pretreatments on corn cob for biogas production. *Renew. Energy*, 107: 597-603.

Perucci, G.G.S. & G.O. Rodrigues. 2018. Resíduos orgânicos e a aplicação doméstica do biogás gerado. Trabalho de conclusão de disciplina, USP, 2018.

Petravić-Tominac, V., N. Nastav, M. Buljubalić, B. Lantek. 2020. Current state of biogas production in Croatia., *Energy Sustain. Soc.*, 8: 1-10.

Picco, D., M. Pin, A. Vecchiet, R. Balducci, G. Di Natale, I. Piscioneri, F. Fornasier, C. Mondini & E. Tomat. 2011. Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water-use efficient energy crop. 19th European Biomass Conference and Exhibition,

Pimentel-Gomes, F. 2009. Curso de estatística experimental. 15.ed. Piracicaba: Esalq, 477 p.
Pinho, R.G.V., R.C. Vasconcelos, I.D. Borges & A.V. Rezende. 2006. Influência da Altura de Corte das Plantas nas Características Agronômicas e Valor Nutritivo das Silagens de Milho e de Diferentes Tipos de Sorgo. *Rev. Bras. Milho Sorgo*, 5: 266-279.

Pompermayer, R.S. & D.R. Paula Junior. 2000. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural, 2000.

Popp, J., S. Kovács, J. Oláh, Z. Divéki & E. Balázs. 2021. Bioeconomy: biomass and biomass-based energy supply and demand. *N Biotechnol*, 60: 76-84.

Rabelo, E.A. 2019. Palhas de milho e de feijão como co-substratos na digestão anaeróbia de esterco bovino leiteiro. Dissertação de Mestrado, UnB, 57 p.

Rodrigues, L.N. 2019. Potencial da produção de biogás a partir da codigestão de Dejetos bovino e macrófita invasora (*hydrilla verticillata*). Dissertação de Mestrado, UNILA, 75 p.

Rosa, J.R.P., J.H.S. Silva, J. Restle, L.L. Pascoal, I.L. Brondani, D.C. Alves Filho & A.K. Freitas. 2004. Avaliação do Comportamento Agronômico da Planta e Valor Nutritivo da Silagem de Diferentes Híbridos de Milho (*Zea mays*, L.). *R. Bras. Zootec.*, 33: 302-312.

Salimbeni, A. 2013. Sweet Sorghum Biogas Plant in Temperate Regions (Belgium) - Demonstration Plant for Biogas and High Value Biofertilizer Production. 21st European Biomass Conference and Exhibition.

Salomon, K.R. 2007. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade. Tese de Doutorado, UNIFEI, 219 p.

Samarappuli, D. & M.T. Berti. 2018. Intercropping forage sorghum with maize is a promising alternative to maize silage for biogas production. *J. Clean. Prod.*, 194: 515-524.

Santin, T.P., K.M. Frigeri, A. Agostini, H.R. Silva, K.M. Frigeri, N.Z. Kalles, E.M. Coelho & A.M. Dias. 2020. Características fermentativas e composição química da silagem de sorgo (*Sorghum bicolor*) com uso de aditivos absorventes. *Braz. J. of Develop*, 6: 54931-54943.

Santos, C.A., E.P. Frigo & C.E.C. Nogueira. 2014. Estudo do panorama da geração de energia a partir da biomassa de resíduos na região sul do Brasil. *Acta Iguazu* 3: 87-96.

Santos, J.M.C.F.S. 2009. Avaliação da biomassa de plantas bioenergéticas. Dissertação de Mestrado, ISA, Lisboa, 79 p.

Schittenhelm, S. 2010. Effect of Drought Stress on Yield and Quality of Maize/Sunflower and Maize/Sorghum Intercrops for Biogas Production. *J AGRON CROP SCI*, 196: 253-261.

Schwengber, J.C. & M.A.A. Coelho. 2016. Estudo de viabilidade econômica de plantas de biogás a partir de silagem de milho para geração de energia elétrica no Estado de Rondônia. Disponível em: <<http://www.decon.unir.br/wp-content/uploads/2016/05/Estudo-de-viabilidade-econ%C3%B4mica-de-plantas-de-biog%C3%A1s-a-partir-de-silagem-de-milho-para-gera%C3%A7%C3%A3o-de-energia-el%C3%A9trica-Julio-C%C3%A9sar-Schwengber.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

Senghor, A., R.M.N. Dioh, C. Müller & I. Youm. 2017. Cereal crops for biogas production: a review of possible impact of elevated CO₂. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 71: 548-554.

Serrano-Ruiz, J.C. 2020. Biomass: a renewable source of fuels, chemicals and carbon materials. *Molecules*, 25: 1-3.

Severo, I.K. 2021. Híbridos de milho para silagem em diferentes densidades populacionais na safra e safrinha. Dissertação de Mestrado, UTFPR, 60 p.

Silva, G.A. 2017. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto. Dissertação de Mestrado, UFP, Recife, 103 p.

Silva, T.N. & L.M.S. Campos. 2008. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes - SP. *Eng. Sanit. Ambient.*, 13: 88-96.

Soares, C.M.T., A. Feiden & S. Tavares. 2017. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. *Nativa*, 5: 509-514.

Soares, R.J.S.; A.A. Pinto, F.T. Camara & L.D. Santana. 2017. Produtividade de massa verde de milho transgênico em função do arranjo populacional na região do Cariri, CE. *Interações (Campo Grande)*, 18: 117-127.

Sorda, G., M. Banse & C. Kemfert. 2010. An overview of biofuel policies across the world. *Energy Policy*, 38: 6977-6988.

Souza, A.R., A.T.Y.L. Silva, A.B. Trindade, F.F. Freitas & J.A. Anselmo. 2019. Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do

efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). Eng. Sanit. e Ambient., 24: 887-896.

Souza, D.M.G. de & Lobato, E. 2004. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 416 p.

Theuretzbacher, F., A. Bauer, J. Lizasoain, M. Becker, T. Rosenau, A. Potthast, A. Friedl, G. Piringer & A. Gronauer. 2013. Potential of different *Sorghum bicolor* (L. moench) varieties for combined ethanol and biogas production in the Pannonian climate of Austria. Energy, 55: 107-113.

Torres, M. 2014. Sorgo biomassa é ótima opção para geração de energia. Embrapa. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/2246665/sorgo-biomassa-e-otima-opcao-para-geracao-de-energia>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

Veriato, F.T., D.A.A. Pires, D.C. Tolentino, D.D. Alves, D.G. Jayme & M.A. Moura. 2018. Fermentation characteristics and nutritive values of sorghum silages. Acta Sci. Anim. Sci., 40: 1-8.

Wannasek, L., M. Ortner, B. Amon & T. Amon. 2017. Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield. Biomass and Bioenergy, 106: 137-145.

Wannasek, L., M. Ortner, H.P. Kaul, B. Amon & T. Amon. 2019. Double-cropping systems based on rye, maize and sorghum: impact of variety and harvesting time on biomass and biogas yield. EUR J AGRON, 110: 1-10.

Windpassinger, S., W. Friedt, M. Frauen, R. Snowdon & B. Wittkop. 2015. Designing adapted sorghum silage types with an enhanced energy density for biogas generation in temperate Europe. Biomass And Bioenergy, 81: 496-504.

Wit, M. & A. Faaij. 2010. European biomass resource potential and costs. Biomass and Bioenergy, 34: 188-202.

Wünsch, K., S. Gruber & W. Claupein. 2012. Profitability analysis of cropping systems for biogas production on marginal sites in southwestern Germany. Renew. Energy, 45: 213-220.

Zhao, B., H. Sha, J. Li, S. Cao, G. Wang & Y. Yang. 2020. Static magnetic field enhanced methane production via stimulating the growth and composition of microbial community. J. Clean. Prod., 271: 1-24.

Zhong, W., Z. Zhang, Y. Luo, S. Sun, W. Qiao & M. Xiao. 2011. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. Bioresour. Technol., 102: 11177-11182.