

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO



ANA LUIZA DE SOUSA CASTRO

**USO DO CAPIM-ELEFANTE PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: TENDÊNCIAS DE
PESQUISAS MUNDIAIS E POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS NO
ESTADO DE ALAGOAS**

Maceió

2021

ANA LUIZA DE SOUSA CASTRO

**USO DO CAPIM-ELEFANTE PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: TENDÊNCIAS DE
PESQUISAS MUNDIAIS E POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS NO
ESTADO DE ALAGOAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientadora: Prof^ª. Dra..Daniele Vital Vich

Maceió

2021

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C355u Castro, Ana Luiza de Sousa.

Uso do capim-elefante para produção de energia : tendências de pesquisas mundiais e potencial para geração de biogás no estado de Alagoas / Ana Luiza de Sousa Castro. – 2021.

113 f. : il. color.

Orientadora: Daniele Vital Vich.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió.

Bibliografia: f. 100-110.

Apêndices: f. 111-113.

1. Bibliometria. 2. Bioenergia. 3. Co-digestão anaeróbia. 4. Cultura energética. 5. *Pennisetum purpureum*. I. Título.

CDU: 662.767.2

Dedico este trabalho aos meus pais e
minhas irmãs, meus maiores
incentivadores.

AGREDECIMENTOS

Aos meus pais, Maria das Graças e Luiz Fernando, pelo apoio e amor incondicionais. Por me derem o privilégio da educação. Tudo o que sou devo a vocês. Muito obrigada!

Às minhas irmãs, Carolina, Bárbara e Lannay, por serem meu alicerce e estarem sempre presentes me encorajando a seguir em frente.

Ao Daniel, meu companheiro, por todo apoio e compreensão.

À minha orientadora, Daniele Vich, por todo conhecimento compartilhado. Por me mostrar uma docência humana e acessível. Por acreditar e confiar no meu trabalho. Obrigada!

Às amigas que encontrei no PPGRHS, Amanda Moraes e Valéria Carneiro. Obrigada por tornarem essa experiência mais leve.

À Olga Rocha e Wanessa Ribeiro pelo suporte e ajuda ao longo da minha trajetória no PPGRHS.

À Isabela Menezes, minha grande amiga, por sempre impulsionar o meu desenvolvimento.

À Natália Freire, Raíssa Mota e Rayanne Araújo pelas palavras de incentivo.

Aos professores de PPGRHS, em especial à professora Karina Ribeiro, pela oportunidade e conhecimento compartilhado.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

A todos que, de alguma forma, torceram e contribuíram com minha chegada até aqui.

Plantemos a roça. Lavremos a gleba.

Cuidemos do ninho,

do gado e da tulha. Fartura teremos;

e donos de sítio felizes seremos.

Cora Coralina

RESUMO

A crescente demanda por energia e a conseqüente ameaça à segurança energética tornaram o uso de fontes renováveis uma necessidade mundial. Nesse contexto, o uso de culturas energéticas mostra-se uma alternativa promissora. Destaca-se aqui o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), uma gramínea com elevada produção de biomassa e alta adaptabilidade, podendo ser cultivada em diversos tipos de solo, inclusive degradados, não competindo com culturas alimentares. Essas características o tornaram atrativo para o mercado energético em diversos cenários, a exemplo da produção de biogás. Este trabalho objetivou analisar sistematicamente pesquisas científicas acerca da digestão anaeróbia a partir do capim elefante para a produção de biogás e avaliar a viabilidade teórica de produção de energia a partir de co-digestão de silagem da gramínea com resíduos da bovinocultura, suinocultura e avicultura no Estado de Alagoas. Visando entender as tendências mundiais acerca do tema, foi realizada uma análise bibliométrica utilizando a base de dados Scopus. Para avaliação do potencial teórico de produção de energia a partir do biogás em Alagoas, foram levantados dados de efetivos de rebanho de bovinos leiteiros, suínos e galináceos nas microrregiões alagoanas. O quantitativo de capim-elefante foi calculado a partir da relação C/N da mistura. Posteriormente, partindo do pressuposto que o plantio da gramínea não é exequível em todo o Estado, foram levantados hectares disponíveis para cultivo do capim considerando dados de colheita da cana-de-açúcar fornecidos pelo IBGE. As áreas requeridas e disponíveis foram confrontadas. As áreas resultantes do confronto foram utilizadas para a estimativa da produção de energia. Foram publicados 143 documentos ao longo de 36 anos, porém poucas publicações foram voltadas para avaliação da idade ótima de colheita do capim-elefante para produção de biogás, aplicação de pré-tratamentos para superar a hidrólise lenta e uso da gramínea como segundo substrato em processos de co-digestão anaeróbia. No que tange ao potencial energético em Alagoas, o cenário onde houve a co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos de avicultura apresentou melhor desempenho. Quanto à microrregião, destacou-se a de Arapiraca, em especial o município de São Sebastião. Ao final do trabalho, foi possível concluir que, com base no número de publicações, a produção de biogás a partir do capim-elefante ainda está pouco difundida na comunidade científica. Em Alagoas, Arapiraca apresenta-se como um potencial polo de produção de energia alternativa, contribuindo assim para a diversificação da matriz energética do Estado.

Palavras-chaves: Análise Bibliométrica, Bioenergia, Co-digestão Anaeróbia, Cultura Energética, *Pennisetum Purpureum*

ABSTRACT

The growing demand for energy and the consequent threat to energy security have made the use of renewable sources a necessity worldwide. In this context, the use of energy crops is a promising alternative. Elephant grass (*Pennisetum purpureum*) is a grass with high biomass production, high adaptability and it grows in a wide variety of soils, including degraded soils, thus not competing with food crops. These characteristics have made elephant grass attractive to the energy market in several scenarios, such as biogas production. This study aimed to systematically analyze scientific research on anaerobic digestion from elephant grass for biogas production and evaluate the theoretical feasibility of energy production from co-digestion of grass silage with waste from cattle, pig and poultry farming in the state of Alagoas. In order to understand the trends of scientific researches, a bibliometric analysis was performed using the Scopus database. To evaluate the theoretical potential for energy production from biogas in Alagoas, data on dairy cattle, pig and chicken herds in the micro-regions of Alagoas were collected. At first, only the herd numbers were considered and the quantitative of elephant grass was calculated from the C/N ratio of the mixture. Later, assuming that the planting of the grass is not feasible in the whole state, available hectares for grass cultivation were surveyed considering sugarcane harvest data provided by IBGE. The information about required area and available area were compared. The resulting areas were used to estimate the energy production. The results showed that 143 papers were published over 36 years. However, most of the papers had a subject matter different from the interest of this study. The remaining publications are mainly focused on the evaluation of the optimal age for harvesting elephant grass for biogas production, the application of pre-treatments in order to overcome the slow hydrolysis and the use of the grass as a second substrate in anaerobic co-digestion processes. Regarding the energy potential in Alagoas, the scenario where there was co-digestion of elephant grass silage and poultry waste showed better performance. As for the micro-region, the micro-region of Arapiraca stood out, especially the city of São Sebastião. At the end of the work, it was possible to conclude that, based on the number of publications observed, the production of biogas from elephant grass is still poorly disseminated in the scientific community. In Alagoas, Arapiraca presents itself as a potential pole of alternative energy production, thus contributing to the diversification of the energy matrix of the state.

Keywords: Energy Crops, Bibliometric Analysis, Bioenergy, *Pennisetum Purpureum*, Anaerobic Co-digestion

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Fluxograma da metodologia aplicada na análise bibliométrica.....	23
Figura 3.2: Total de publicações ente os anos de 1984 e 2020 e artigos de pesquisa publicados no mesmo período sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante.....	26
Figura 3.3: Produção acumulada de artigos de pesquisa sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante publicados durante os anos de referência.....	27
Figura 3.4: Países com maior número de artigos científicos publicados. PT, Total de artigos de pesquisa publicados.	28
Figura 3.5: Rede colaborativa entre países nos artigos de pesquisas sobre produção de biogás a partir do capim-elefante publicados entre os anos de 1984 e 2020.	29
Figura 3.6: Publicação de artigos de pesquisa anual sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020 dos países mais produtivos.....	30
Figura 3.7: Artigos de pesquisa por categoria de estudo publicados entre os anos de 1984 e 2020.....	32
Figura 3.8: Porcentagem de instituições por Estado brasileiro com publicação sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.	36
Figura 3.9: Rede de palavras-chaves utilizada pelos autores sobre produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.....	39
Figura 3.10: Rede de palavras-chaves utilizada pelos autores entre os anos de 1984 e 1990.	40
Figura 3.11: Rede de palavras-chaves utilizada pelos autores entre os anos de 1991 e 2000.	42
Figura 3.12: Rede de palavras-chaves utilizadas pelos autores entre os anos de 2001 a 2010.	43
Figura 3.13: Rede de palavras-chaves utilizada entre os anos de 2011 e 2020.....	44
Figura 4.1: Fluxograma da metodologia aplicada para estimativa do potencial energético. ..	60
Figura 4.2: Mapa de situação do Estado de Alagoas, Brasil.....	63
Figura 4.3: Potenciais energéticos (kW) por microrregião alagoana no Cenário 1.	73
Figura 4.4: Potenciais energéticos (kW) por microrregião alagoana no Cenário 2.	74
Figura 4.5: Potenciais energéticos (kW) por microrregião alagoana no Cenário 3.	75
Figura 4.6: Área colhida em hectares de cana-de-açúcar por microrregião alagoana no ano de 2017.....	76
Figura 4.7: Potencial energético (kW) das microrregiões alagoanas nos cenários 1, 2, e 3. ..	79
Figura 4.8: Comparativo entre área colhida e área requerida para cultivo do capim-elefante no Cenário 1.	80

Figura 4.9: Potencial elétrico do biogás produzido no Cenário 1 por microrregião alagoana.	81
Figura 4.10: Comparativo entre área colhida e área requerida para cultivo do capim-elefante no Cenário 2.	82
Figura 4.11: Potencial elétrico (kW) do biogás produzido no Cenário 2 por microrregião alagoana.	83
Figura 4.12: Comparativo entre área colhida e área requerida para cultivo do capim-elefante no Cenário 3.	84
Figura 4.13: Potencial elétrico do biogás produzido no Cenário 3 por microrregião alagoana.	85
Figura 4.14: Potencial elétrico (kW) na microrregião Arapiraca.	86
Figura 4.15: Potencial elétrico na microrregião Litoral Norte Alagoano.	87
Figura 4.16: Potencial elétrico(kW) na microrregião Maceió.....	88
Figura 4.17: Potencial elétrico(kW) na microrregião Mata Alagoana.	89
Figura 4.18: Potencial elétrico na microrregião Palmeira dos Índios.	90
Figura 4.19: Potencial elétrico(kW) na microrregião Penedo.....	91
Figura 4.20: Potencial elétrico (kW) na microrregião São Miguel dos Campos.	92
Figura 4.21: Potencial elétrico (kW) na microrregião Serrana do Sertão Alagoano.....	93
Figura 4.22: Potencial elétrico (kW) na microrregião Serrana dos Quilombos.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Número total de publicações por tipo de documento (PT), porcentagem em relação ao total publicado (%), número de autores (AU), média de autores por tipo de documento (AP), quantidade de citações (CT) e média de citação por documento (CP).	25
Tabela 3.2: Número de periódicos por área de estudo publicados entre os anos de 1984 e 2020.	31
Tabela 3.3: Produção dos 10 periódicos com maior número de publicação de artigos de pesquisa entre os anos de 1984 e 2020.	33
Tabela 3.4: Instituições com maior número de publicação de artigos de pesquisa sobre produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.	35
Tabela 3.5: Autores com maior número de publicação sobre produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.	37
Tabela 4.1: Municípios componentes das microrregiões e mesorregiões do Estado de Alagoas.	65
Tabela 4.2: Estimativa de geração diária de dejetos em kg por animal.	66
Tabela 4.3: Parâmetros utilizados para o cálculo de potencial de produção de biogás.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

US\$	Dólar americano
μmoles	Micromoles
ABR	Do inglês <i>Anaerobic Baffled Reactor</i>
baht	Moeda tailandesa
bar	Unidade de pressão
BMP	Do inglês <i>Biochemical Methane Potential</i>
C/N	Relação entre carbono e nitrogênio
CH ₄	Gás metano
CHTP	Do inglês <i>convective hydrothermal pretreatment</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
CODA	Co-digestão Anaeróbia
CSTR	Do inglês <i>Continuos Stirred-tank Reactor</i>
CSV	Do inglês <i>Comma-separated-values</i>
DA	Digestão anaeróbia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
g	Gramas
GWh	Gigawatts-hora
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kcal	Quilocaloria
Kg	Quilograma
kJ	Quilojoule

kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mL	Mililitro
mm	Milímetro
MW	Megawatts
MWP	Do inglês <i>microwave pretreatment</i>
NaOH	Hidróxido de sódio
NmL	Volume normalizado à temperatura padrão (273 K) e pressão (1 atm).
N-NH ₃	Nitrogênio amoniacal
OLR	Do inglês <i>Organic Loading Rate</i>
PCI	Poder calorífico inferior
PDA	Do inglês <i>Potato Dextrose Agar</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PO ³⁻ ₄	Fostato
PPMM	Pesquisa de Pecuária Municipal
rai	Unidade de área (1 m ² = 0,000625 rai)
rpm	Rotações por minuto
scCO ₂	Do inglês <i>Supercritical Carbon Dioxide</i>
SO ²⁻ ₄	Sulfato
ST	Sólidos Totais
Std	Do inglês <i>Standard</i>

SV

Sólidos Voláteis

SUMÁRIO

Capítulo 1 : Introdução geral	17
Capítulo 2 : Objetivo geral e objetivos específicos	20
2.1. Objetivo geral	20
2.1. Objetivos específicos	20
Capítulo 3 : Revisão bibliométrica acerca da digestão anaeróbia do capim-elefante para a produção de biogás entre os anos de 1984 e 2020	21
3.1. Introdução	21
3.2. Metodologia.....	23
3.2.1. Base de dados.....	24
3.2.2. Extração e análise dos dados	24
3.3. Resultados e discussão	25
3.3.1. Características dos documentos e informações iniciais	25
3.3.2. Produção científica por país.....	27
3.3.3. Análise por categoria de publicação	30
3.3.4. Periódicos.....	32
3.3.5. Instituições e autores.....	34
3.3.6. Palavras-chaves.....	37
3.3.6.1. Primeira década (1984 a 1990).....	40
3.3.6.2. Segunda década (1991 a 2000).....	42
3.3.6.3. Terceira década (2001 a 2010).....	43
3.3.6.4. Quarta década (2011 a 2020)	44
3.4. Conclusão	54
Capítulo 4 : Potencial teórico de produção de energia a partir do biogás oriundo da co-digestão anaeróbia de silagem de capim-elefante e dejetos de diferentes criações de animais em Alagoas	56
4.1 Introdução	56
4.2 Metodologia.....	60
4.2.1 Caracterização da área	63
4.2.2 Coleta de dados	65
4.2.3 Estimativa de produção de biogás.....	67
4.2.4 Conversão energética	68
4.3 Resultados e discussão	71
4.3.1 Etapa 1: Potencial energético do Estado de Alagoas a partir da co-digestão anaeróbia da silagem do capim-elefante e dejetos de diferentes criações de animais considerando os efetivos de rebanho.	72

4.3.2	Etapa 2: Potencial energético do Estado de Alagoas a partir da co-digestão anaeróbia da silagem do capim-elefante e dejetos de diferentes criações de animais considerando os efetivos de rebanho e capacidade de produção de capim-elefante.	75
4.3.2.1	Cenário 1: Dejetos da bovinocultura e silagem de capim-elefante	80
4.3.2.2	Cenário 2: Dejetos da suinocultura e silagem de capim-elefante.....	82
4.3.2.3	Cenário 3: Dejetos da avicultura e silagem de capim-elefante	83
4.3.3	Avaliação do potencial energético dos municípios alagoanos a partir da co digestão anaeróbia de silagem de capim-elefante e dejetos de três diferentes criações de animais.	85
4.3.3.1	Arapiraca	86
4.3.3.2	Litoral Norte Alagoano	87
4.3.3.3	Maceió.....	88
4.3.3.4	Mata Alagoana	89
4.3.3.5	Palmeira dos Índios	89
4.3.3.6	Penedo	90
4.3.3.7	São Miguel dos Campos.....	91
4.3.3.8	Serrana do Sertão Alagoano.....	92
4.3.3.9	Serrana dos Quilombos	93
4.4	Conclusão	95
Capítulo 5 : Considerações finais		97
Capítulo 6 : Perspectivas para trabalhos futuros		99
REFERÊNCIAS		100
APÊNDICE A – Potenciais energéticos das microrregiões alagoanas considerando o efetivo de rebanho e a capacidade de produção de capim-elefante.		111

Capítulo 1 : Introdução geral

O aumento populacional de uma sociedade cada vez mais dependente de eletricidade e com padrões de consumo progressivamente mais altos fez da segurança energética uma preocupação global (THAEMNGOEN et al., 2020). Esse fato, associado à perdurável dependência mundial por combustíveis fósseis que, além de serem finitos, representam uma grande ameaça ao meio ambiente, torna o fornecimento de energia para gerações futuras um grande desafio.

Nesse contexto, a produção de energia a partir da biomassa vegetal tem se tornado uma alternativa energética bastante viável. No Brasil, em especial, essa opção mostra-se altamente pertinente tendo em vista a vasta extensão de terras agricultáveis.

Os cultivos gerados com o objetivo de produção de biomassa para geração de energia são denominados culturas energéticas. Sua conversão pode ser obtida a partir da combustão direta, por combustíveis sólidos ou através da produção de biocombustíveis, como o bioetanol, biodiesel e o biogás (LAURENT et al., 2015).

Atualmente, diversas culturas são cultivadas tendo como finalidade a produção de biocombustível. A exemplo, tem-se a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, o carvão vegetal proveniente de plantações de eucalipto e o uso da biomassa em indústrias de papel e celulose (GOLDEMBERG E LUCON, 2007). Entretanto, o uso de biocombustível se tornou controverso devido à competição por terras entre culturas energéticas e culturas alimentares (LAURENT et al., 2015). De acordo com Samson et al. (2005), com vistas a evitar esse conflito, as culturas energéticas devem ser plantadas em regiões onde os cultivos alimentares normalmente não se desenvolvem, como encostas desmatadas ou terrenos rasos.

Nesse sentido, o uso do capim-elefante merece destaque. Gramínea de alto rendimento tradicionalmente utilizada na alimentação de ruminantes, o capim-elefante ou capim Napier (*Pennisetum purpureum*) pode crescer em diversos tipos de solo, inclusive em solos degradados. Ademais, possui rápido crescimento, com curto ciclo de produção, o que possibilita múltiplas colheitas ao ano. Essas características, associadas ao elevado percentual de lignina (28,2%) e celulose (11,9%), e alto poder calorífico, tornaram o capim-elefante atrativo para o mercado energético em diversos cenários, como na produção de energia térmica, de biocombustíveis sólidos (*pellets* e briquetes) e/ou de etanol celulósico (CARVALHO et al., 2016; MARAFON et al., 2016; DA SILVA et al., 2020).

Diante disso, diversos estudos avaliaram o desempenho do capim-elefante como cultura energética. Em pesquisa realizada para analisar a viabilidade energética de 18 variedades de capim-elefante, Marafon et al. (2015) concluíram que a gramínea possui potencial para ser utilizada como fonte na produção de energia térmica devido às características qualitativas desejáveis, principalmente ao alto poder calorífico, semelhante à maioria das biomassas utilizadas para esse fim. Outros estudos também comprovaram a aplicabilidade do capim-elefante como matéria-prima na geração de energia a partir da sua combustão. O elevado percentual de fibras e lignina, alta relação C/N e elevado poder calorífico favorecem a produção de um carvão de boa qualidade com mínimo consumo de energia fóssil (QUESADA et al., 2004; MARAFON et al., 2016).

No que tange ao seu uso para geração de etanol celulósico, é declarada a necessidade de aplicação de métodos de pré-tratamento para induzir mudanças na estrutura química e na composição da biomassa. Ante o exposto, Scholl et al. (2015) analisaram a produção de etanol do capim-elefante pré-tratado com explosão a vapor. Os resultados mostraram que temperaturas mais elevadas resultam em maiores rendimentos de açúcares e de etanol provenientes do capim-elefante. Já Menegol et al. (2016) indicaram que é possível produzir etanol a partir do capim-elefante, desde que um pré-tratamento como a moagem e um pré-tratamento químico como a hidrólise enzimática sejam realizados simultaneamente.

Mais recentemente, a produção de energia utilizando como fonte o capim-elefante vem sendo avaliada sob uma nova perspectiva, a de geração de biogás através da digestão anaeróbia (DA). Nesse processo, a matéria orgânica é convertida, na ausência de oxigênio, em um gás composto, sobretudo, por gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (CHERNICHARO, 2016; MUTHUDINESHKUMAR E ANAND, 2019). Outros elementos, como nitrogênio, amônia, hidrogênio e ácido sulfídrico também podem estar presentes em menor proporção (CHANDRA; TAKEUCHI E HASEGAWA, 2012). Por apresentar elevado teor de CH_4 (50-75%), o biogás possui grande potencial energético e, quando removida a parcela de CO_2 , tem desempenho comparável ao do gás natural atualmente utilizado.

De forma geral, as pesquisas apresentam a adição do capim-elefante à digestão de uma cultura animal em uma tentativa de potencializar a produção de biogás e/ou gás metano. Os resultados mostram que, de fato, a inclusão da gramínea melhora expressivamente o rendimento de biogás e de metano (HARYANTO et al., 2018). Esse desempenho pode ser ainda superior quando utilizado processos de pré-tratamento como a hidrólise na biomassa do capim antes da sua aplicação na digestão anaeróbia. Nesse cenário, a geração de CH_4 alcançar

um rendimento 64% superior ao da mono-digestão de resíduos animais (CARVALHO et al., 2016).

Ainda assim, o uso da biomassa, em especial o capim-elefante, como fonte energética ainda é um desafio para a ciência. Faz-se necessário, desta forma, o desenvolvimento de estudos que busquem o fomento do potencial energético do capim-elefante, principalmente no Brasil, onde as características climáticas e a disponibilidade de vasta extensão de terra agricultável favorecem o cultivo da gramínea (ALVES et al., 2018).

Diante do exposto, o presente trabalho realizou uma análise minuciosa das tendências mundiais gerais acerca da digestão anaeróbia a partir do capim-elefante para a produção de biogás, identificando os progressos da ciência por período de publicação. Ademais, foi avaliado a viabilidade teórica de produção de energia a partir de co-digestão da gramínea com resíduos de diferentes criações de animais no Estado de Alagoas.

Para tanto, o estudo foi estruturado em seis capítulos, conforme apontado abaixo:

Capítulo 1 – Introdução Geral

Capítulo 2 – Objetivo Geral e Objetivos Específicos

Capítulo 3 – Revisão bibliométrica acerca da digestão anaeróbia do capim-elefante para a produção de biogás entre os anos de 1984 e 2020;

Capítulo 4 – Potencial teórico de produção de energia a partir do biogás oriundo da co-digestão anaeróbia de silagem de capim-elefante e diferentes criações de animais em Alagoas;

Capítulo 5 – Considerações Finais

Capítulo 6 – Perspectivas para Trabalhos Futuros

Capítulo 2 : Objetivo geral e objetivos específicos

2.1.Objetivo geral

O presente estudo teve como objetivos principais analisar as tendências mundiais acerca da digestão anaeróbia a partir do capim-elefante para a produção de biogás e avaliar a viabilidade teórica de produção de energia a partir de co-digestão da gramínea com resíduos de diferentes criações de animais no Estado de Alagoas.

2.1.Objetivos específicos

- Realizar uma análise quantitativa das pesquisas publicadas acerca da digestão anaeróbia do capim-elefante e produção de biogás, identificando periódicos, autores e instituições;

- Realizar uma análise qualitativa das pesquisas por meio de mapeamento científico da temática e identificação dos avanços científicos por período de publicação;

- Estimar o potencial teórico de produção de biogás, e respectivo potencial energético, nas microrregiões do Estado de Alagoas a partir da co-digestão de dejetos de diferentes criações de animais e silagem de capim-elefante;

- Avaliar a distribuição espacial no Estado do potencial energético nos cenários analisados;

- Identificar a microrregião com maior potencial energético nos cenários avaliados.

Capítulo 3 : Revisão bibliométrica acerca da digestão anaeróbia do capim-elefante para a produção de biogás entre os anos de 1984 e 2020

3.1.Introdução

O crescente avanço da atividade científica, atrelado a um maior incentivo e aporte para o desenvolvimento de pesquisas, culminou em um aumento do interesse de autores e instituições em expor resultados através da publicação de seus estudos. Nesse ponto, torna-se evidente a relevância da aplicação de métodos de análise bibliométrica para a avaliação da distribuição e características das publicações (CAÑAS-GUERRERO et al., 2013).

Estudos bibliométricos consistem na análise de publicações científicas por meio de *softwares* e ferramentas estatísticas que fornecem uma estrutura geral da área pesquisada, permitindo avaliar a produção e disseminação do conhecimento científico. É uma forma de introduzir rigor quantitativo à avaliação subjetiva da literatura, compreendendo, dentre outros, os padrões regionais, extensão de colaborações e avanços tecnológicos (ANDREO-MARTÍNEZ et al., 2020; HASSAN, KAMDEM E DA ROCHA., 2020; ZUPIC E CATER, 2015).

Seus principais usos incluem a análise de desempenho e o mapeamento científico. Na análise de desempenho, são avaliados o desempenho da pesquisa e a publicação de autores e instituições, podendo inferir a produção e impacto a partir do número de publicações e citações. No que concerne ao mapeamento científico, a estrutura e a dinâmica dos campos científicos são indicadas, tornando-se útil para o estudo de uma linha específica (ZUPIC E CATER, 2015).

De modo geral, as informações necessárias para a construção de um estudo bibliográfico são obtidas a partir de uma base de dados, ou seja, de sítios onde estão localizadas revistas científicas e seus respectivos artigos. Nesse contexto, merecem destaque a *Web Of Science (WoS)*, da Thomson Reuters, e a *Scopus*, da companhia *Elsevier Science*.

Estudos recentes avaliaram de forma comparativa as duas bases de dados. De acordo com Sánchez et al. (2017), a *WoS* e *Scopus* diferem em termos de alcance, volume de dados e políticas de cobertura, com um elevado grau de fontes e artigos únicos, de forma que são complementares e não mutuamente exclusivas. Uma conclusão semelhante foi obtida por Gonzalez de Dios, Alonso-Arroyo e Alexandre-Benavent (2019). Segundo os autores, as bases possuem discrepâncias nos indicadores devido a diferentes políticas de indexação, cobertura e métodos de classificação dos artigos.

Por outro lado, Tsai et al. (2020), declaram que a *Scopus*, quando comparada a outras bases de dados, apresenta melhor alcance de publicações e maior quantidade de dados bibliométricos relevantes. Por esse motivo, diversos estudos estão utilizando a *Scopus* como base de dados para a construção de levantamentos bibliográficos (MD-KHUDZARI et al., 2018; JAMWAL et al.;2020; MALANSKI, DEDIEU E SCHIAVI, 2021).

No presente estudo, técnicas bibliométricas foram utilizadas para a apuração do cenário geral da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do capim-elefante. Para tanto, informações acerca das publicações foram obtidas na base de dados *Scopus* para uma análise de desempenho das pesquisas e mapeamento científico.

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), também conhecido como *Napier Grass*, é uma gramínea perene de origem africana cultivada em diversas regiões do mundo. Se adapta a diferentes tipos de solo e clima, no entanto tem desempenho potencializado em altas intensidades luminosas e altas temperaturas (metabolismo do tipo C4). É culturalmente utilizado na alimentação de ruminantes, entretanto, devido à alta produção de biomassa, vem sendo bastante estudado pela comunidade científica para uso como matéria-prima para geração de energia limpa (ROCHA-MENESES et al., 2010; THAEMNGOEN et al., 2020; WU et al., 2020).

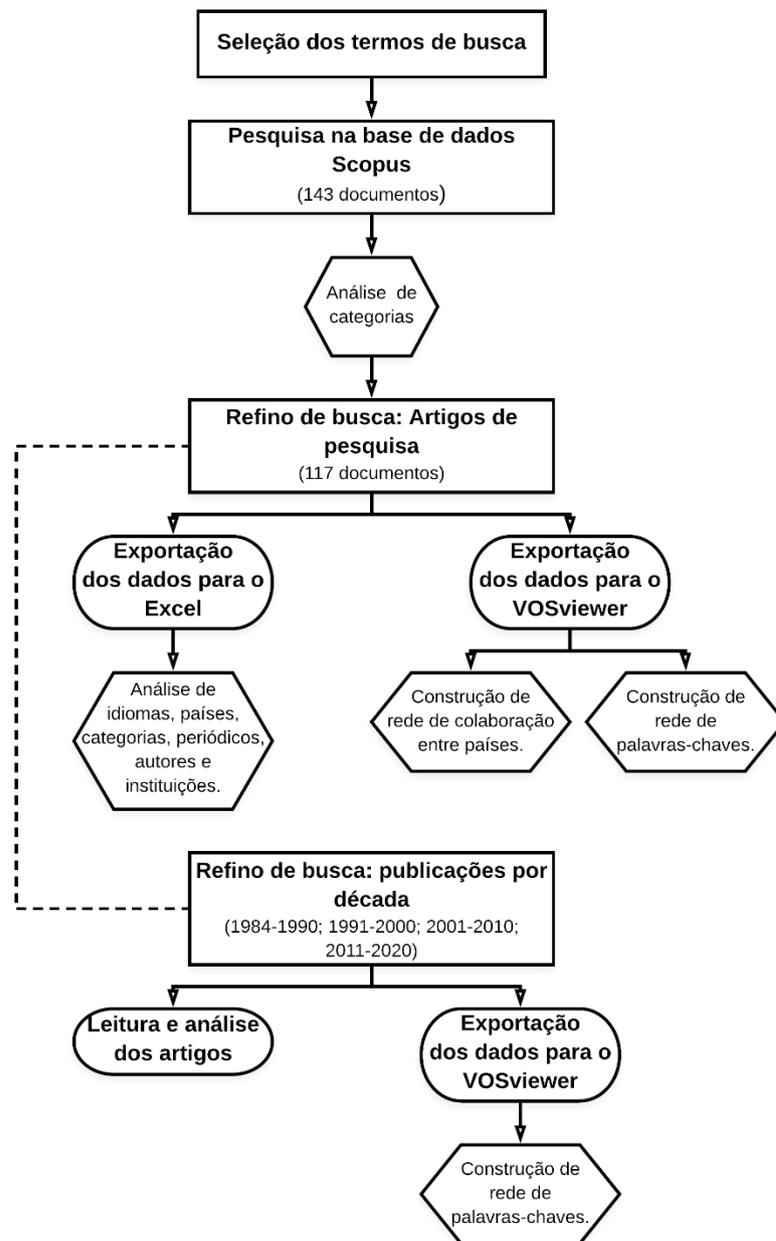
Nesse sentido, diversos autores buscaram avaliar o rendimento de biogás a partir da gramínea sob diferentes perspectivas, a exemplo do efeito de pré-tratamentos na biomassa do capim para uso na digestão anaeróbia (NARINTHORN et al., 2019; PHUTTARO et al., 2019b; KULLAVANIJAYA E CHAVALPARIT, 2020; SARITPONGTEERAK et al., 2020), idade dos cultivares para colheita (PARDANG et al., 2020) e co-digestão anaeróbia com distintos substratos (JEHLEE et al., 2019; KONGJAN et al., 2019; BEGUM et al., 2020). Entretanto, não foram localizados estudos que apresentassem uma análise global de publicações científicas ao longo dos anos mostrando dados quantitativos e/ou qualitativos das pesquisas já realizadas sobre a temática.

Isto posto, após a análise de 143 artigos publicados na base *Scopus*, esse trabalho apresenta, pela primeira vez, detalhamentos acerca da produção de biogás e digestão anaeróbia do capim-elefante. O estudo observou tendências gerais e específicas do tema, identificando avanços e lacunas do conhecimento na área a fim de nortear futuras pesquisas dentro da temática.

3.2. Metodologia

O presente estudo avaliou o cenário e tendências de pesquisa sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante. Termos de busca foram escolhidos estrategicamente para a obtenção de dados na base *Scopus*. As informações foram avaliadas utilizando o programa *Microsoft Excel*. Foram construídas redes de interação com o auxílio do programa *VOSviewer*. A metodologia utilizada está descrita na Figura 3.1.

Figura 3.1: Fluxograma da metodologia aplicada na análise bibliométrica.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.1. Base de dados

A base de dados *Scopus* (<https://www.scopus.com/>) foi utilizada para a construção desse trabalho. Além de ser o maior repositório de resumos e citações de literatura revisada em pares, abrangendo trabalhos de diversas áreas, como ciências sociais, tecnologia e medicina, essa base possui ferramentas bibliométricas que possibilitaram uma melhor análise e visualização da pesquisa.

A busca foi realizada entre os dias 21 e 28 de outubro de 2020. O objetivo foi avaliar publicações que relatassem a produção de biogás a partir da gramínea capim-elefante. Entretanto, existem várias variações dos dois termos. Assim, para possibilitar um maior alcance de trabalhos, a pesquisa foi realizada utilizando as seguintes palavras de busca: tema (“*ELEPHANT GRASS*” or “*PENNISETUM PURPUREUM*” or “*NAPIER GRASS*”) and tema (“*BIOGAS PRODUCTION*” or “*METHANE PRODUCTION*” or “*ANAEROBIC DIGESTION*”). O uso de aspas (“ ”) é necessário para que a pesquisa entregue o conteúdo exato que está sendo buscado (USMAN E HO, 2020).

Em um primeiro momento, nenhum tipo de filtro foi utilizado, retornando um total de 143 documentos. Com esse grupo, foram feitas análises dos idiomas das publicações e tipos de documentos. Em seguida, após a aplicação de filtro de busca para retorno apenas de artigos de pesquisa, foram realizados estudos de países, categorias, periódicos, instituições, autores, além de uma investigação minuciosa do conteúdo abordado, por década, acerca do tema.

3.2.2. Extração e análise dos dados

Os dados obtidos na base *Scopus* foram analisados com o suporte dos programas *Excel* e *VOSviewer*. As informações acerca do tipo de documento, idioma, instituições, países, número de publicações e citações foram exportadas para o *Microsoft Excel*, onde foram transformadas em gráficos e tabelas.

O arquivo de busca foi exportado em formato CSV para a observação de similaridades e construção de esquemas interativos. Para tal, foi utilizado o programa *VOSviewer* (versão 1.6.5). Esta ferramenta organiza os dados em redes de colaboração para obter mapas baseados em *clusters* (DI CIACCIO E TROOISI, 2021). Assim, foi possível avaliar a co-autoria de países, instituições e autores e a co-ocorrência de palavras-chaves.

Posteriormente, a busca na base de dados foi filtrada por décadas (1984 a 1990; 1991 a 2000; 2001 a 2010; 2011 a 2020) para a análise das particularidades de cada período e da evolução do tema ao longo dos anos.

3.3.Resultados e discussão

A busca a partir da base de dados *Scopus* forneceu documentos produzidos entre os anos de 1984 e 2020. Ao todo, foram anexados 143 arquivos relacionados à geração de biogás a partir do capim-elefante publicados em 70 periódicos que envolveram mais de 160 autores e 33 países. A seguir, será apresentada uma análise de desempenho e mapeamento científico baseados nas informações retornadas.

3.3.1. Características dos documentos e informações iniciais

Um total de cinco categorias de documentos foram encontradas, sendo elas artigo de pesquisa (117; 81,8%), artigo de conferência (21; 14,7%), revisão de conferência (3; 2,1%), artigo de revisão (1; 0,7%) e capítulo de livro (1; 0,7%).

Além de representar a maioria dos arquivos encontrados, os artigos de pesquisa apresentam melhor desempenho em relação ao número de citações, tendo uma média de 10,3 citações por documento publicado. Na Tabela 3.1 é possível observar o número total de publicações por tipo de documento (PT), a porcentagem em relação ao total publicado (%), o número de autores (AU), a média de autores por tipo de documento (AP), quantas citações os documentos tiveram (CT) e a média de citação por documento (CP).

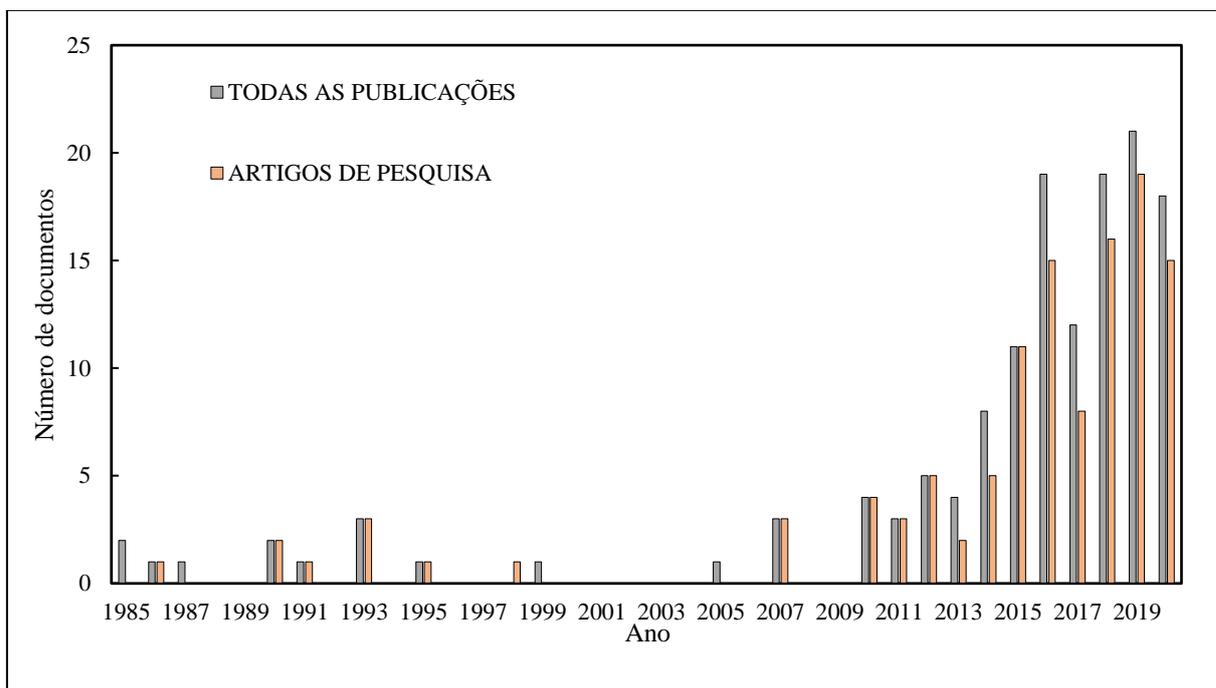
Tabela 3.1: Número total de publicações por tipo de documento (PT), porcentagem em relação ao total publicado (%), número de autores (AU), média de autores por tipo de documento (AP), quantidade de citações (CT) e média de citação por documento (CP).

Tipo de documento	PT	%	AU	AP	CT	CP
Artigo de pesquisa	117	81,8	159	1,4	1251	10,8
Artigo de conferência	21	14,7	66	3,1	75	3,6
Revisão de conferência	3	2,1	-	-	0	0
Artigo de revisão	1	0,7	8	8	5	5
Capítulo de livro	1	0,7	3	3	1	1

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A Figura 3.2 traz de forma comparativa o número de artigos de pesquisa publicados nos anos de referência e o número total de publicações no mesmo período. Dada a predominância dos artigos de pesquisa e a relevância para a continuidade desse estudo, apenas documentos desse tipo foram considerados para uma análise mais aprofundada.

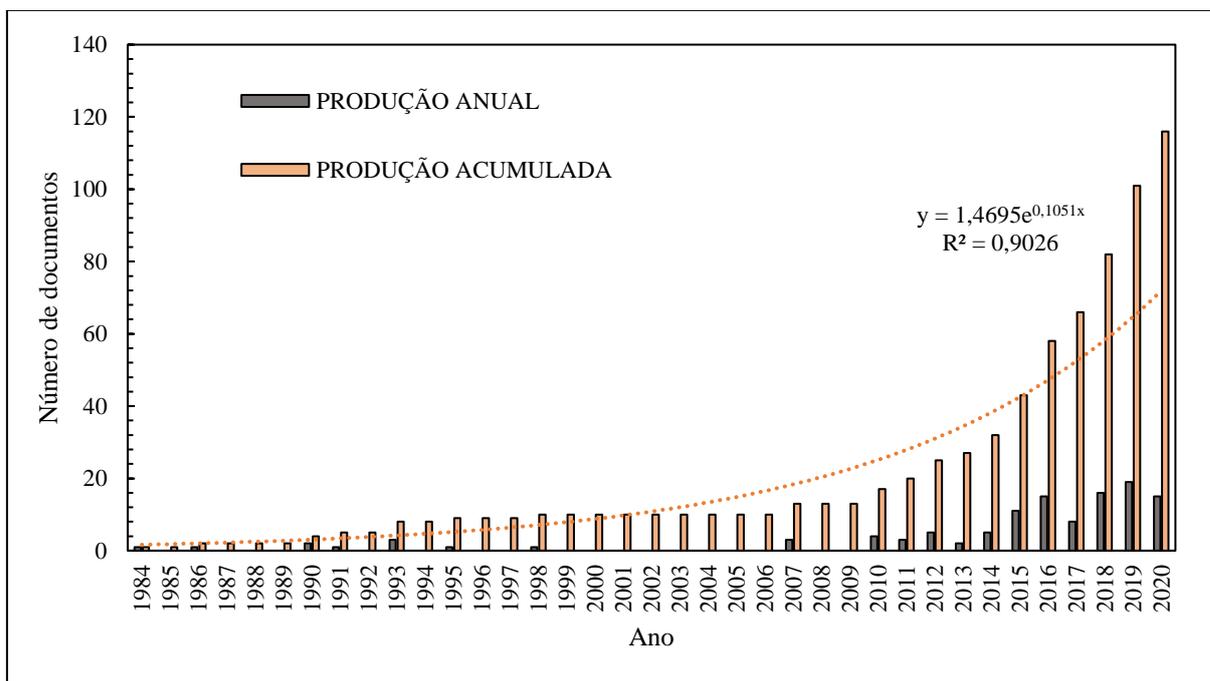
Figura 3.2: Total de publicações entre os anos de 1984 e 2020 e artigos de pesquisa publicados no mesmo período sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O primeiro artigo de pesquisa publicado na base de dados *Scopus* sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante data do ano de 1984. No entanto, até o fim da primeira década do século XXI, as publicações eram realizadas de forma esporádica, representando aproximadamente 11% do total publicado. A partir de 2010, o tema começou a ganhar popularidade, iniciando um crescimento exponencial (Figura 3.3). O número acumulado de artigos de pesquisa foi ajustado a uma curva exponencial com um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9073$), sendo previsto, até o ano de 2030, a publicação de 140 artigos dessa categoria.

Figura 3.3: Produção acumulada de artigos de pesquisa sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante publicados durante os anos de referência.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dos 117 artigos de pesquisa publicados, 107 foram escritos em inglês, representando mais de 91,45% dos documentos. Os demais estudos tinham como idioma o português (5; 4,27%), chinês (3; 2,56%) e espanhol (2; 1,71%).

3.3.2. Produção científica por país

O estudo mostrou que o continente asiático é o grande fomentador científico das discussões, estando associado a quase 50% dos artigos de pesquisa publicados. Em segundo lugar está a América do Norte com 19 publicações, seguida pela América do Sul (18), América Central (18) e Europa (16). Há registros de publicações também na África (7) e Oceania (5).

Um total de 33 países contribuíram com publicações sobre produção de biogás a partir do capim-elefante. A Tailândia é o país com maior destaque, com 31 publicações até o ano de 2020. Essa região possui um clima extremamente favorável ao crescimento de gramíneas como o capim-elefante. Apesar de ser uma planta de fácil adaptação, o crescimento dessa forrageira é potencializado em áreas de clima tropical.

Além da Tailândia, os Estados Unidos (17), Brasil (12), China (12) e México (11) mostram-se relevantes em número de publicações. Apesar de terem apenas 17 artigos anexados, os EUA lideram o *ranking* de citações, totalizando 619 menções em documentos. É

o país com maior número de ligações externas, com produções realizadas em parceria com Tailândia, Reino Unido, Brasil, Alemanha, Malásia e China. Ademais, o primeiro artigo de pesquisa indexado à base de dados foi produzido por instituições estadunidenses no ano de 1984. Desde então, o país manteve-se atuante, ainda que de forma temporalmente espaçada.

A Figura 3.4 apresenta o *ranking* dos 15 países com maior número de artigo de pesquisa publicados acerca da temática nos anos de referência e os respectivos número de publicações.

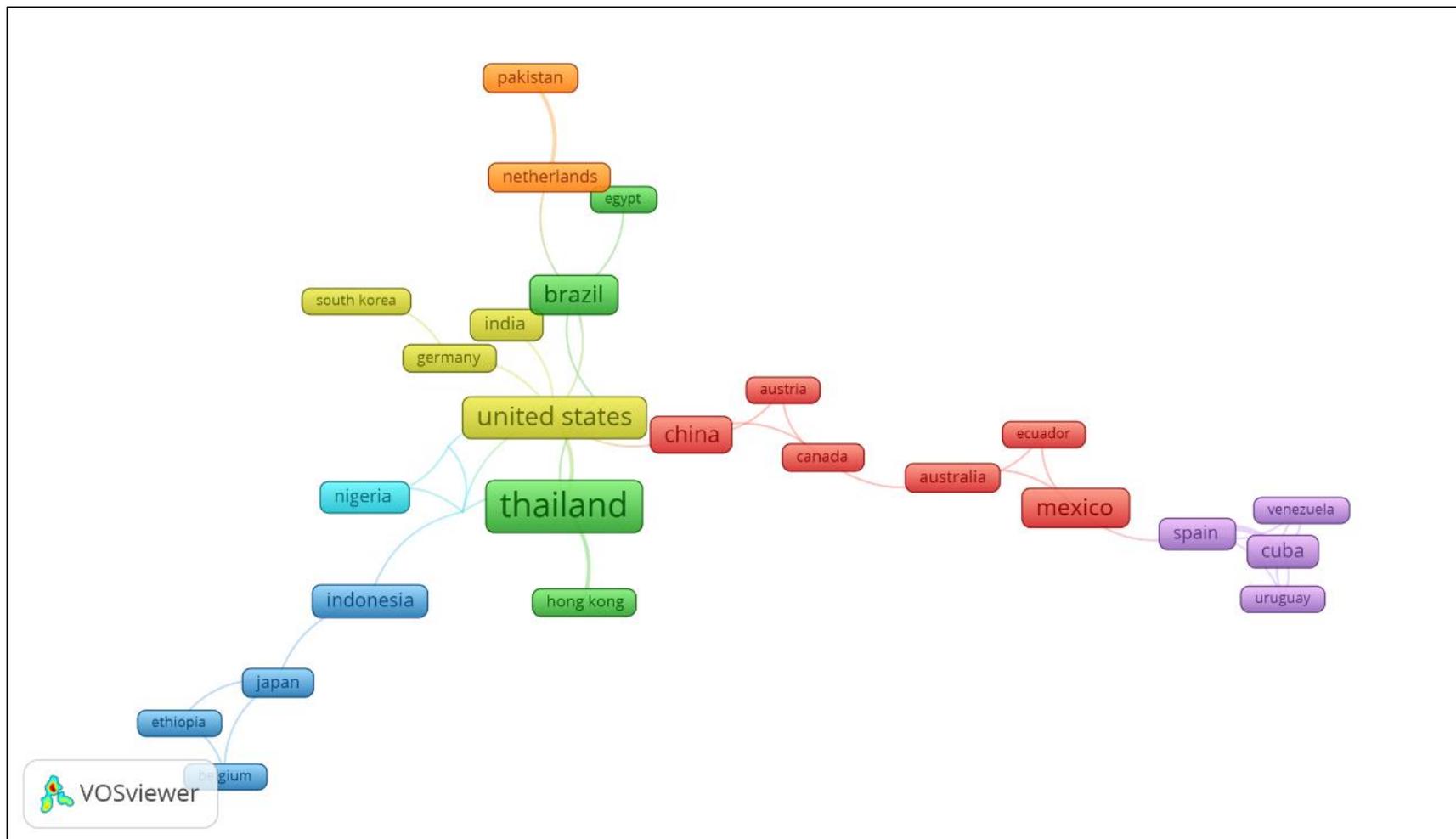
Figura 3.4: Países com maior número de artigos científicos publicados. PT, Total de artigos de pesquisa publicados.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao todo, foram localizados sete *clusters*, isto é, grupos de países que possuem colaborações entre si, pelo programa *VOSviewer*. O Brasil apresenta interligações com Egito, Nova Zelândia, Holanda e Estados Unidos. Seu *cluster* inclui, ainda, Tailândia e China (Figura 3.5).

Figura 3.5: Rede colaborativa entre países nos artigos de pesquisas sobre produção de biogás a partir do capim-elefante publicados entre os anos de 1984 e 2020.



Fonte:

Elaborado

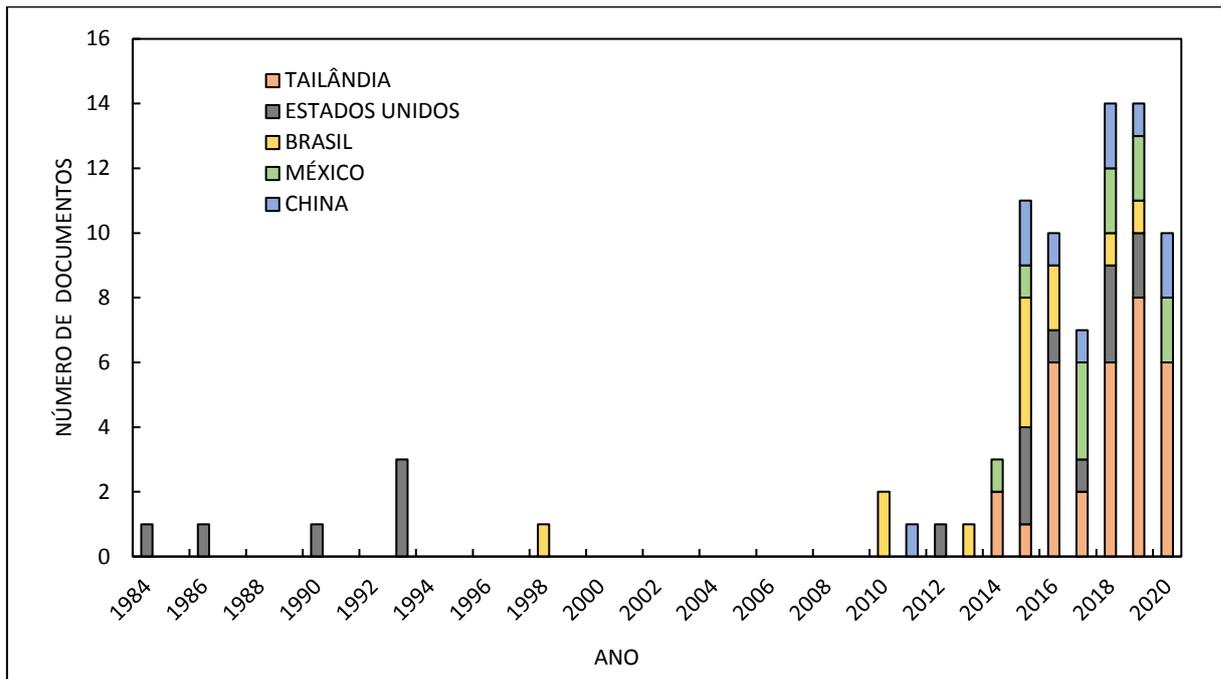
pela

autora

(2021).

A Figura 3.6 apresenta, em ordem cronológica, o número de artigos de pesquisa com origem nos países citados anteriormente. Nota-se que a Tailândia, atual líder no número de trabalhos, iniciou suas atividades somente na última década. O Brasil teve seu primeiro artigo publicado em 1998. Após esse ano, passou por um período de inatividade, retornando em 2010.

Figura 3.6: Publicação de artigos de pesquisa anual sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020 dos países mais produtivos.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.3. Análise por categoria de publicação

Os artigos foram publicados em 70 revistas pertencentes a 20 categorias distintas. As áreas com maior número de periódicos foram Ciências Agrária e Biológica (26%), Ciência Ambiental (17%), Energia (15%) e Engenharia Química (10%).

A classificação dos periódicos segundo a *Scopus* pode englobar mais de uma categoria. A exemplo, a *Bioresource Technology*, revista com maior número de artigos publicados, está classificada em três categorias: Engenharia Química, Energia e Ciências Ambientais. Dessa forma, a soma de periódicos por categoria extrapola o número real de revistas com publicações sobre o termo buscado registradas na base de dados (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Número de periódicos por área de estudo publicados entre os anos de 1984 e 2020.

Área	Número de periódicos
Ciências Agrárias e Biológicas	61
Ciência Ambiental	40
Energia	34
Engenharia Química	23
Engenharia	15
Veterinária	13
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	11
Química	6
Matemática	5
Imunologia e Microbiologia	4
Enfermagem	3
Ciências da Terra e Planetária	3
Multidisciplinar	3
Física e Astrologia	3
Material Científico	2
Medicina	2
Ciências Sociais	2
Negócios, Gestão e Contabilidade	1
Ciência da Computação	1
Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica	1

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

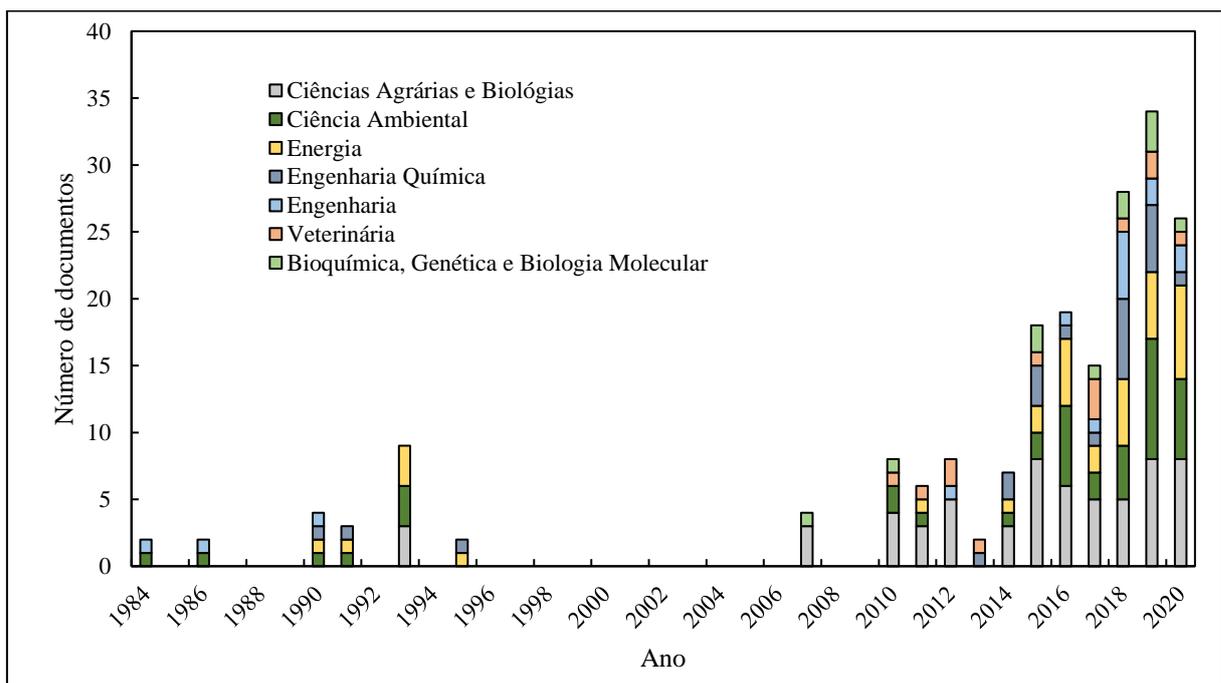
As primeiras publicações mostram o capim-elefante como matéria prima para produção de energia a partir do biogás, estando classificadas em Ciência Ambiental, Engenharia e Engenharia Química. A ideia da gramínea como substrato partiu da tentativa de solucionar uma problemática que afetava os produtores rurais da época: por ser de fácil crescimento, o capim era gerado em excesso, revelando-se um resíduo ambientalmente indesejável. Seu uso na digestão anaeróbia passou então a ser visto como uma alternativa de descarte que viria a substituir as queimadas, prática nociva ao meio-ambiente (SHIRALIPOUR E SMITH, 1984; WILKIE et al.,1986; EKWENCHI et al., 1990).

A partir da década de 90, os estudos acerca do uso do capim-elefante como uma fonte energética tornaram-se escassos, perdendo espaço para a sua aplicação na agroindústria. As publicações tinham como objetivo, sobretudo, maximizar o aproveitamento energético de ruminantes que eram alimentados com a planta. O gás metano aqui era visto como algo a ser

combatido: além de ter efeitos negativos ao meio-ambiente devido à sua relação com o efeito estufa, a produção elevada de CH₄ representava uma perda significativa de energia alimentar que poderia ser potencialmente redirecionada para a produção de carne e leite (SOLTAN et al., 2013).

Pesquisas centradas em melhorias do capim para uso na dieta de animais prevalecem até os dias atuais. No entanto, a partir do início da segunda década de 2000, categorias como Energia, Engenharia e Engenharia Química foram ganhando força. Em 2020, após um crescimento de quase 86% comparado ao ano de 2014, o número de periódicos classificados como Energia foi quase igualado à quantidade de revistas da área de Ciências Agrárias e Biológicas, sendo de 7 e 8, respectivamente (Figura 3.7). Esses números podem indicar que, nos últimos anos, o capim-elefante voltou a ser estudado como uma fonte energética alternativa, assim como era em meados de 1980.

Figura 3.7: Artigos de pesquisa por categoria de estudo publicados entre os anos de 1984 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.4. Periódicos

Dos 70 periódicos registrados, 50 apresentaram uma única publicação. Os 10 periódicos com maior número de publicações estão listados na Tabela 3.3. Juntos, registram um total de 48 trabalhos, aproximadamente 42% dos 117 artigos de pesquisa. O *Bioresource*

Technology, periódico com maior número de artigos, apresenta o maior Fator de Impacto (7,539/2019) e, com relação ao número de citações, fica atrás apenas do periódico *Biomass*.

O Fator de Impacto (*Journal Impact Factor*) é uma métrica de avaliação de revistas científicas divulgado pela empresa *Clarivate Analytic*, instituição responsável por outra base de dados, a *Web of Science*. As revistas são avaliadas a partir do número de citações que recebeu durante o ano de referência. De acordo com Garfield (1999), o Fator de Impacto de uma revista é baseado em dois elementos: o numerador, representado pelo número de citações no ano corrente de qualquer artigo publicado nos últimos dois anos, e o denominador, que contempla todos os artigos publicados nos mesmos dois anos.

Tabela 3.3: Produção dos 10 periódicos com maior número de publicação de artigos de pesquisa entre os anos de 1984 e 2020.

Periódico	Número de artigos (%)	Fator de Impacto 2019	Média de citação por artigo
<i>Bioresource Technology</i>	12 (10,26)	7,539	20,08
<i>Biomass and Bioenergy</i>	6 (5,13)	3,551	18,50
<i>Tropical Animal Health and Production</i>	5 (4,27)	1,333	10,20
<i>Animal Feed Science and Technology</i>	4 (3,42)	2,582	19,25
<i>Asian Australasian Journal of Animal Sciences</i>	4 (3,42)	1,664	14,00
<i>Energies</i>	4 (3,42)	2,702	8,00
<i>Livestock Research for Rural Development</i>	4 (3,42)	0,5	1,25
<i>Biomass</i>	3 (2,56)	-	97,33
<i>Cuban Journal Of Agricultural Science</i>	3 (2,56)	0	2,00
<i>Journal Of Environmental Management</i>	3 (2,56)	5,647	6,33

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.5. Instituições e autores

Foram registradas 295 organizações com ao menos um artigo de pesquisa publicado na base de dados. A Tabela 3.5 apresenta as 15 instituições com maior número de documentos. Dessas, seis estão localizadas na Tailândia e cinco na China. Cuba, México, Colômbia e Estados Unidos sediam uma unidade cada.

A Universidade Khon Kaen e a Universidade de Mahidol, ambas situadas na Tailândia, mostram-se mais relevantes devido ao número de artigos. No entanto, é importante destacar o desempenho da Universidade do Haváí, localizada nos Estados Unidos, e Universidade Chiang Mai Rajabhat, Tailândia, pela média de citação p por artigo.

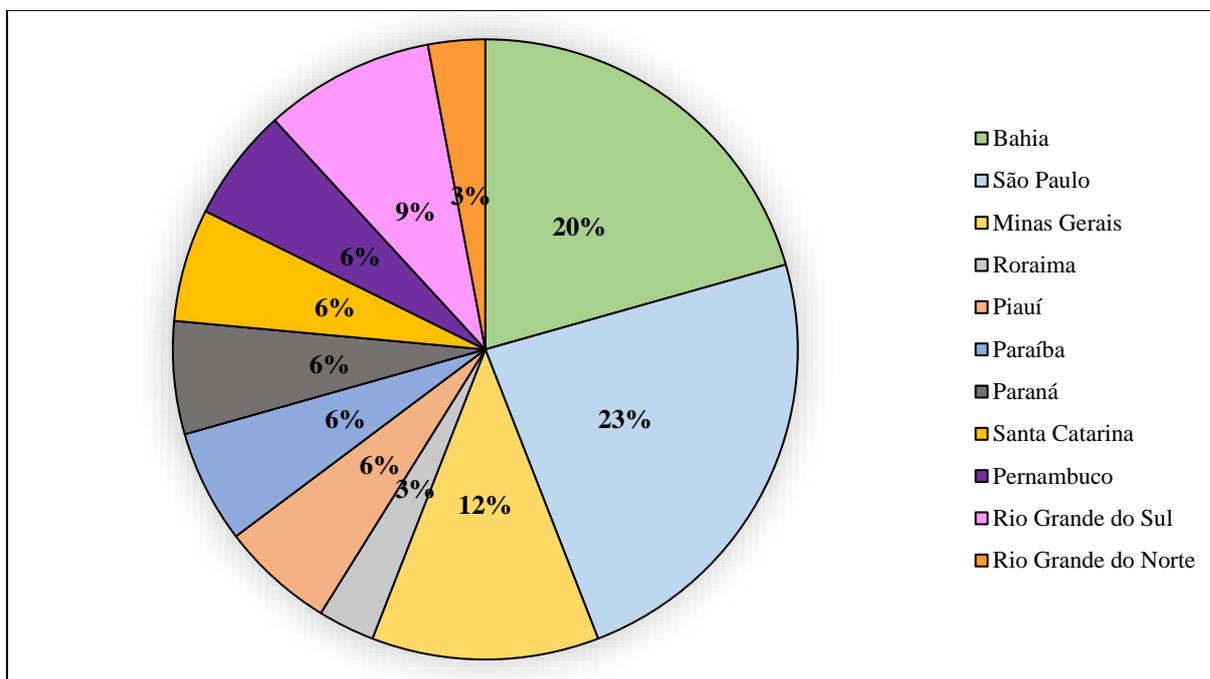
Tabela 3.4: Instituições com maior número de publicação de artigos de pesquisa sobre produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.

Instituição	Número de artigos	Citações	Média de citação por artigo
Universidade Khon Kaen, Tailândia	4	31	7,75
Universidade de Mahidol, Tailândia	4	30	7,5
Instituto de Ciência Animal, Cuba	3	36	12
Laboratório de Energias Renováveis CAS key, China	2	6	3
Laboratório de Investigação e Desenvolvimento de Energias Limpas e Renováveis Guangdong Provincial Key, China	2	6	3
Universidade Chiang Mai Rajabhat, Tailândia	2	29	14,5
Gabinete de educação e desenvolvimento de pesquisa, Tailândia	2	1	0,5
Universidade Politécnica de Hong Kong, China	2	1	0,5
Universidade Príncipe de Songkla, Tailândia	2	30	15
Academia Chinesa de Ciências, China	2	13	6,5
Universidade de Ciências da China, China	2	13	6,5
Universidade Autônoma de Yucatan, México	2	6	3
Faculdade de Agricultura, Tailândia	2	23	11,5
Centro de Investigação de Sistemas Sustentáveis de Produção Agropecuária, Colômbia	2	3	1,5
Universidade do Havaí, Estados Unidos	2	49	24,5

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Brasil, 34 organizações foram verificadas, tendo uma única publicação cada. A região nordeste concentra o maior número de publicações (14), seguida pelo sudeste (12), sul (07) e norte (01). A Figura 3.7 apresenta a porcentagem de instituições com artigos publicados por Estado brasileiro. Destaca-se aqui os Estados de São Paulo e Bahia com 08 e 07 publicações, respectivamente.

Figura 3.8: Porcentagem de instituições por Estado brasileiro com publicação sobre a produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dentre as instituições brasileiras, foram encontrados trabalhos associados à Universidade de São Paulo, à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, à Universidade do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Vale do São Francisco.

No que concerne ao número de autores, de acordo com dados extraídos do programa *VOSviewer*, 429 pesquisadores possuem participação nos 117 artigos de pesquisa publicados. Desses, 76 tiveram seus nomes associados a pelo menos dois documentos, 34 a três e 17 a quatro.

O autor com maior número de trabalhos, considerando autorias e coautorias, foi Ku-Vera, J.C. com 09 artigos publicados, 52 citações e 62 interligações, seguido de Khanal S.K., com 07 publicações, tendo 137 citações e 27 ligações com autores (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Autores com maior número de publicação sobre produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.

Autor	Número de documentos	Número de citações	Total de interligações
Ku-Vera, J.C.	09	52	62
Khanal, S.K.	07	137	27
Aguilar-Perez, C.F.	06	36	44
Ayala-Burgos, A.J.	06	36	44
Alayón-Gamboa, J.A.	06	32	43
Piñeiro-Vázquez, A.T.	06	28	41
Reungsang, A.	06	33	16
Chay-Canul, A. J.	05	24	38

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.6. Palavras-chaves

A análise de palavras-chaves possibilita o entendimento e previsão da evolução da investigação em um campo de estudo, fornecendo detalhes consideráveis acerca dos padrões, tendências ou regularidades que podem existir nas publicações (CAÑAS-GUERRERO et al., 2013; HASSAN, KAMDEM E DA ROCHA, 2020).

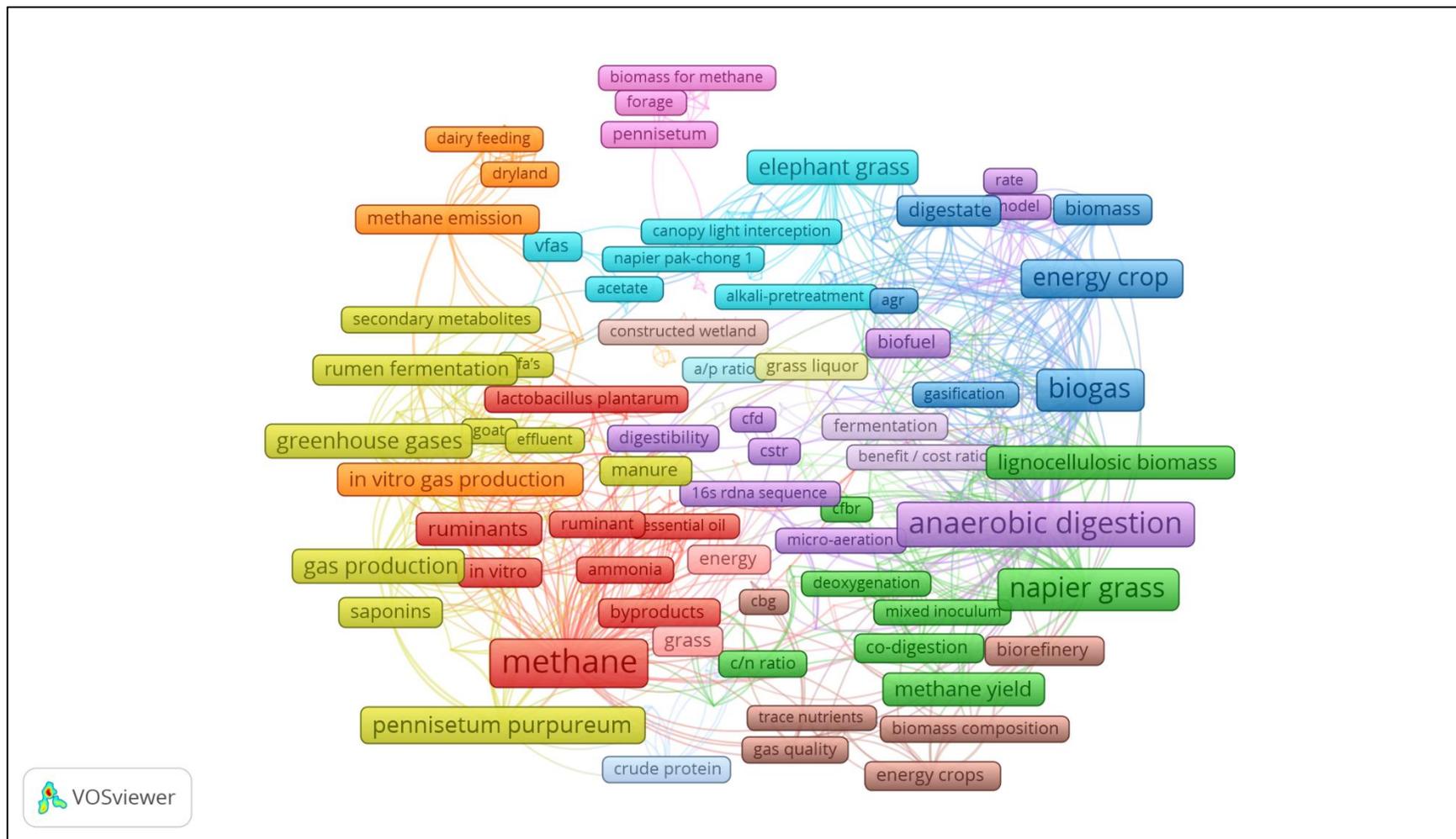
De acordo com o programa *VOSviewer*, 369 palavras-chaves foram utilizadas pelos autores no período que compreende os anos de 1984 a 2020, estando elas divididas em 19 *clusters*. Os termos com maior número de ocorrência foram: “*methane*” (22), “*anaerobic digestion*” (18), “*biogas*” (14), “*napier grass*” (10) e “*energy crop*” (10). Apenas 04% das palavras estiveram presentes em pelo menos cinco trabalhos distintos. Esse resultado evidencia a heterogeneidade das perspectivas abordadas nos estudos.

Ainda que tenham sido escolhidas palavras-chaves que retornassem artigos com a temática exata desejada, mais de 50% dos documentos retornados não correspondiam a produção de biogás a partir do capim-elefante por digestão anaeróbia. Tais documentos representam, em sua maioria, estudos que visam o melhor aproveitamento energético do capim utilizado na alimentação de ruminantes.

Corroborar com essa assertiva a presença de palavras como “*crude protein*”, “*saponins*”, “*methane emission*”, “*dairy feeding*” e “*ruminant*” presentes na rede de palavras apresentada na Figura 3.9. Tais termos são comumente utilizados em pesquisas que abordam essa temática.

Para a obtenção de uma análise detalhada e compreensão da evolução do tema ao longo do tempo, as publicações foram divididas em quatro períodos, a saber, 1984-1990, 1991-2000, 2001-2010 e 2011-2020. Nessa avaliação, apenas artigos que objetivassem a produção de biogás e/ou metano a partir do capim-elefante foram considerados.

Figura 3.9: Rede de palavras-chaves utilizada pelos autores sobre produção de biogás a partir do capim-elefante entre os anos de 1984 e 2020.



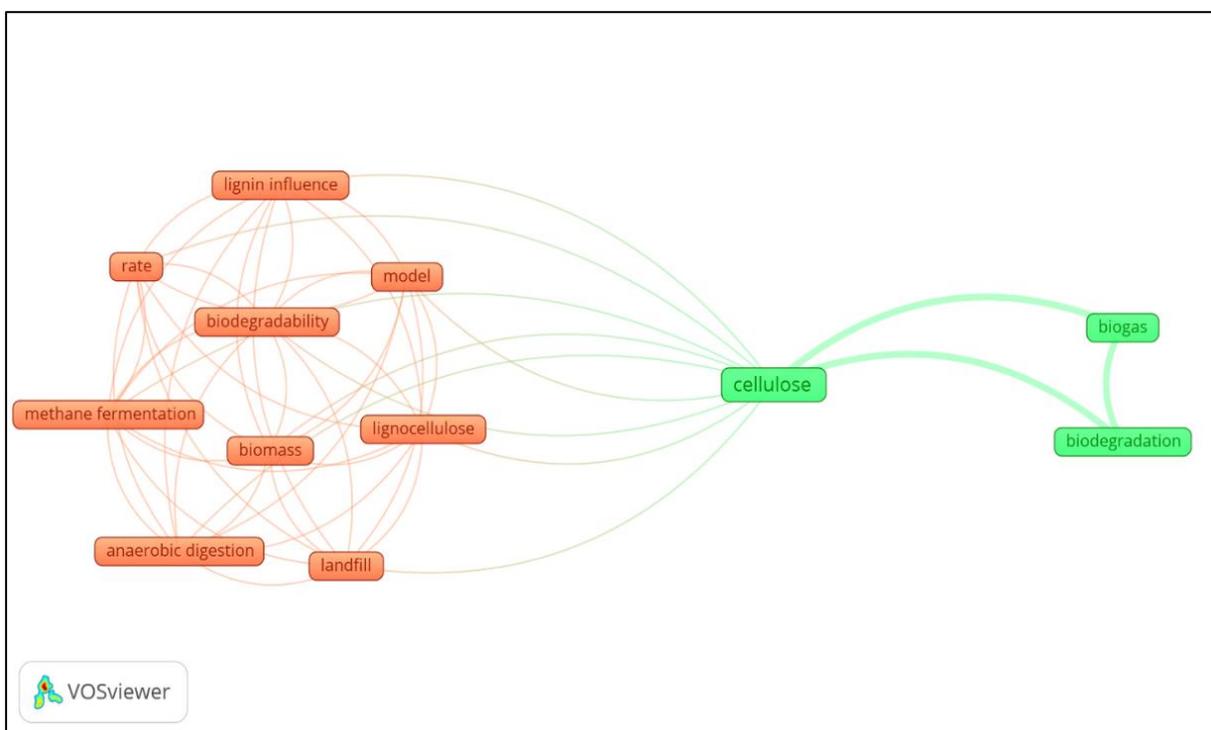
Fonte: Elaborado pela autora (2021.).

3.3.6.1. Primeira década (1984 a 1990)

Foram registrados quatro estudos entre os anos de 1984 e 1990, sendo três originados dos Estados Unidos (1984, 1986, 1990) e um da Nigéria (1990). Nesse período, o capim-elefante começava a ser cogitado como fonte energética devido, principalmente, ao seu elevado potencial de geração de biomassa.

Conforme apresentado pelo programa *VOSviewer*, foram utilizadas 21 palavras-chaves pelos autores nos anos de referência. A palavra “*Cellulose*” foi a mais empregada, sendo a única a estar interligada a todos os outros termos (Figura 3.10).

Figura 3.10: Rede de palavras-chaves utilizada pelos autores entre os anos de 1984 e 1990.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As pesquisas avançaram de formas distintas de modo que, embora avaliassem o rendimento de produção de CH₄ do capim-elefante, os focos dos estudos divergiram. Nos Estados Unidos, Shiralipour e Smith (1984) observaram que gramíneas mais jovens têm um melhor desempenho na produção de biogás do que plantas mais velhas.

Os autores avaliaram o rendimento de metano de mais de 1000 amostras de material vegetal, em triplicata, utilizando frasco de soro como reator. As amostras incluíam materiais lenhosos, plantas aquáticas de água doce, forragens e gramíneas, raízes e tubérculos, plantas marinhas e resíduos de vegetais.

As forragens e gramíneas, de forma geral, tiveram um desempenho mediano, com produções que variaram de 0,07 a 0,41 std.m³/Kg.SV_{adicionado}. Devido à sua alta produtividade de biomassa e ao relativo potencial de conversão (0,32 std.m³/Kg.SV_{adicionado}), o capim-elefante foi selecionado pelos autores para uma investigação intensiva, onde foi avaliada a produção de metano em diferentes idades da gramínea. Os resultados mostraram que tecidos mais jovens produzem mais CH₄ que tecidos mais velhos. Enquanto as gramíneas com idade aproximada de 120 dias tiveram um rendimento médio de metano de 0,31 std.m³/Kg.SV_{adicionado}, o capim com 330 dias gerou uma média de 0,24 std.m³/Kg.SV_{adicionado}. Os autores atribuíram o melhor desempenho das gramíneas mais jovens ao seu teor de lignina que, em geral, é menor quando comparado a plantas mais velhas.

Ainda nos Estados Unidos, Wilkie et al.(1986) propuseram melhoria no rendimento do capim-elefante a partir da adição de micronutrientes. As amostras moídas e secas foram incubadas em reatores construídos com garrafas aspiradoras de 4 litros, mantidas a uma temperatura de 35°C e agitadas utilizando um motor com 60 rpm. Os resultados mostraram que a inclusão de nitrogênio e fósforo resulta em uma baixa produção de metano e alta concentração de ácidos graxos voláteis, enquanto a adição diária de micronutrientes (níquel, cobalto, molibdênio, selênio, sulfato) aumenta a produção de CH₄ em, aproximadamente, 40% (produção média de 0,70 L_{CH4}/d) e diminui as concentrações de ácidos graxos.

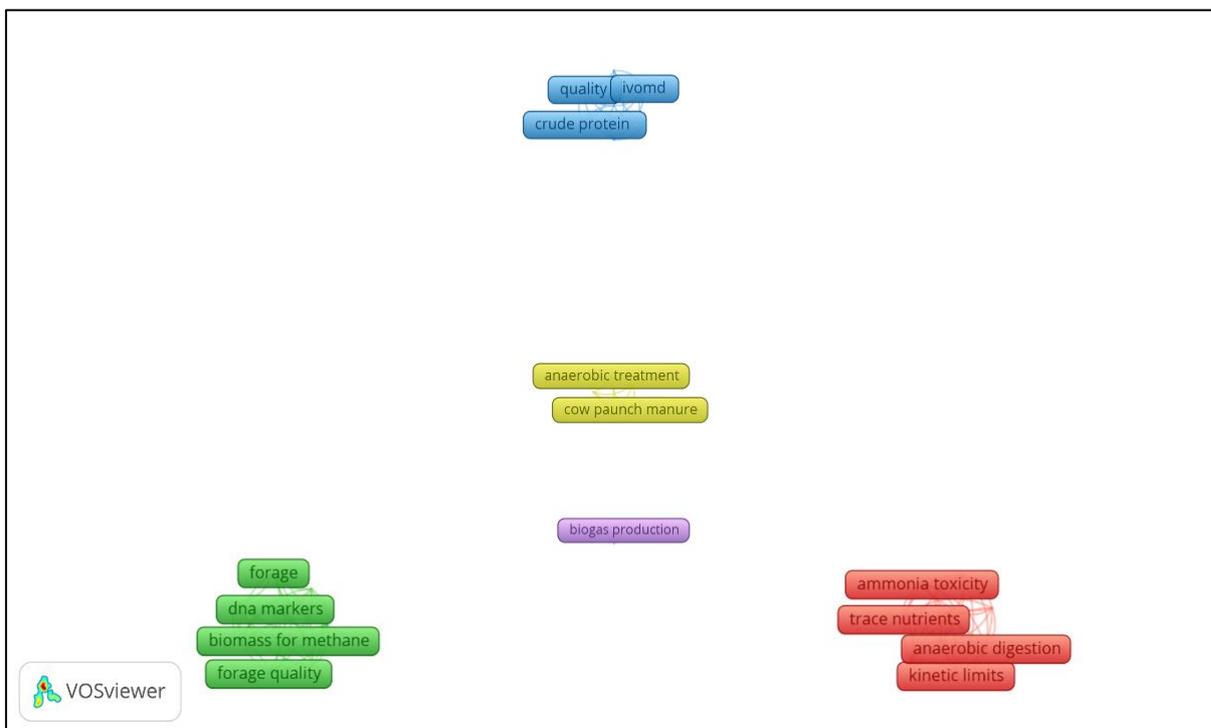
Quatro anos depois, estudos baseados na geração de biogás a partir do capim-elefante voltaram a ser publicados. Na Nigéria, Ekwenchi et al. (1990) estudaram a biodegradação anaeróbia da lignocelulose do capim-elefante por fungos celulíticos. A lignocelulose foi extraída da gramínea por meio de procedimentos sucessivos utilizando benzeno, etanol e água quente. O material extraído foi então incubado em reatores em batelada de 50 cm³ a uma temperatura de 33°C, com a adição de culturas fúngicas puras. O gás produzido apresentou uma proporção de 2:1:1 de dióxido de carbono, metano e propano, respectivamente, tendo uma produção acumulada de 970 μmoles de CH₄ em 20 dias de incubação.

De volta ao continente americano, Tong, Smith e Mccarty (1990) analisaram, nos Estados Unidos, a produção de metano de sete materiais lignocelulósicos, incluindo materiais herbáceos, como o capim-elefante, e biomassas lenhosas. Os autores observaram que, em geral, os materiais herbáceos são degradados mais rapidamente e mais extensivamente do que os materiais lenhosos.

3.3.6.2. Segunda década (1991 a 2000)

As buscas retornaram um total de seis trabalhos publicados entre os anos de 1991 e 2000. Nesse período, o *VOSviewer* apresentou um total de 33 palavras-chaves utilizadas pelos autores e divididas entre cinco *clusters*, isto é, grupos onde os termos se interligam (Figura 3.11).

Figura 3.11: Rede de palavras-chaves utilizada pelos autores entre os anos de 1991 e 2000.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dos seis artigos retornados, um não foi encontrado e três apresentaram objetivos fora do interesse desse trabalho. As duas publicações restantes avançaram em pesquisas acerca do uso de culturas energéticas como matéria-prima para produção de biogás e na utilização de microrganismos mistos e nutrientes para melhorias no rendimento da produção de metano.

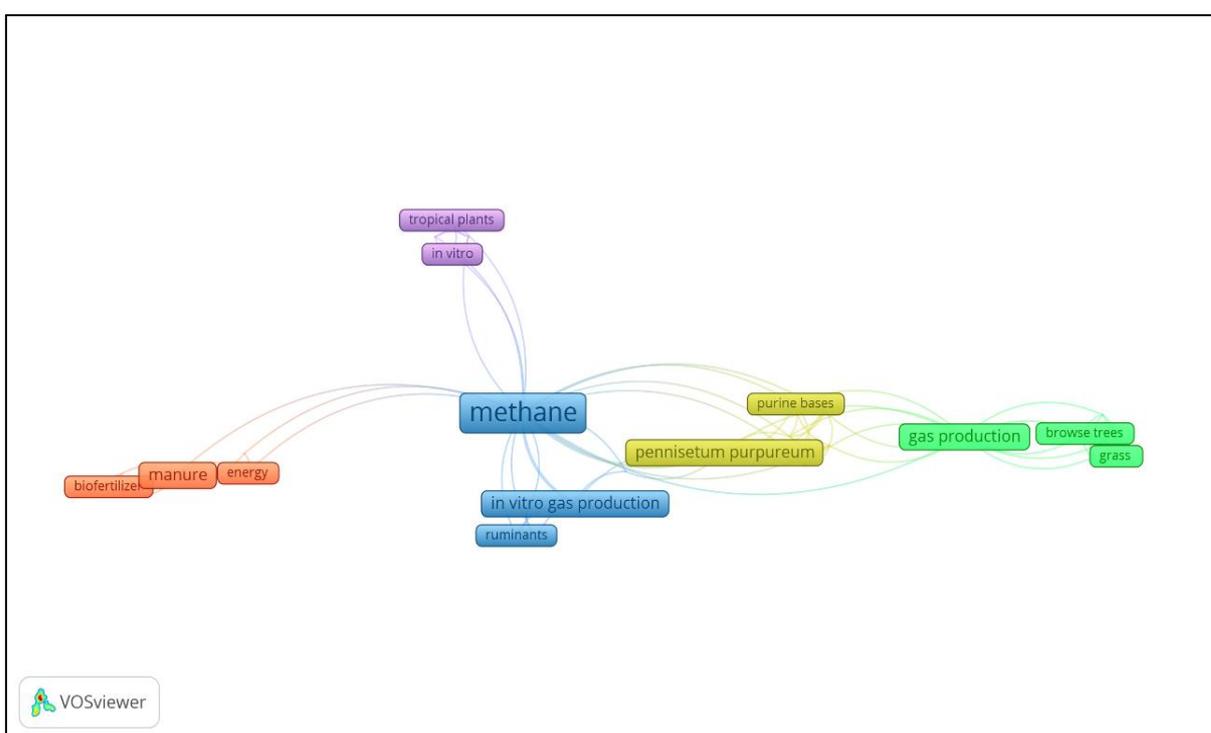
Nos Estados Unidos, Jewell, Cumming e Richards (1993) avaliaram, durante sete anos, a conversão da biomassa do capim-elefante, milho, sorgo e uma mistura de sorgo e celulose. Os pesquisadores observaram que o uso de culturas energéticas combinado com algumas melhorias no processo, permitem aumentar o rendimento do digestor em um fator de 30 vezes em relação aos digestores usados para a digestão de lodo do esgoto. O estudo mostrou que mais de 80% do sólidos voláteis biodegradáveis em culturas energéticas podem ser convertidos em metano.

Ekpenyong et al. (1995) retornaram à uma pesquisa iniciada cinco anos antes. Dessa vez, os autores digeriram o talo do capim com uma mistura de microrganismos, *Potato Dextrose Agar* (PDA) e nutrientes (PO^{3-}_4 , SO^{2-}_4 , ureia e L-asparaginase). Os dados obtidos mostraram que a biodegradação da biomassa do capim por microrganismos mistos é tão eficiente quanto a por culturas puras. Concluíram, ainda, que o suporte com PDA, assim como os nutrientes, é essencial para atingir rendimentos substanciais de biogás.

3.3.6.3. Terceira década (2001 a 2010)

Durante os anos de 2001 a 2010, foram registrados sete artigos de pesquisa acerca do tema e 28 palavras-chaves foram utilizadas pelos autores estando divididas em cinco *clusters*. A palavra mais frequente foi “*Methane*”, sendo, também, o termo com maior número de interligações (Figura 3.12).

Figura 3.12: Rede de palavras-chaves utilizadas pelos autores entre os anos de 2001 a 2010.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dos estudos retornados na base de dados, dois não foram localizados para a análise detalhada do seu conteúdo e quatro tinham objetivos distintos do interesse desse trabalho.

Nesse período, a natureza lignocelulósica do capim-elefante foi identificada como a maior desvantagem para a hidrólise ineficiente e subsequente geração de biogás. Os autores iniciaram, então, formas de tornar a gramínea mais facilmente biodegradável e melhorar a produção de gás.

Na Índia, Rekha e Pandit (2013) utilizaram pré-tratamento alcalino com o objetivo de solubilizar a biomassa lignocelulósica do capim-elefante e, conseqüentemente, aumentar a produção de biogás. Os autores imergiram o capim em solução de NaOH em diferentes concentrações (0,3 %; 0,6% e 0,9%), aquecendo a mistura em temperaturas distintas (70°C, 80°C e 90°C) no período de uma, duas e três horas. As misturas, isto é, o líquido hidrolisado e o resíduo sólido obtido na hidrólise alcalina, foram então incubadas em reatores em batelada de 0,5 L de volume total a 35 °C.

Os autores atestaram a efetividade do pré-tratamento, encontrando a produção ótima de biogás do capim na concentração de NaOH de 0,6%, aquecido a 80°C durante duas horas. Nessas condições, a gramínea apresentou um rendimento de gás de 0,16 m³/kg ST, enquanto a geração do capim não-tratado foi de apenas 0,05 m³/kg ST.

No ano seguinte, ainda na Índia, uma outra abordagem de pré-tratamento para a biomassa do capim foi realizada por Hude e Yadav (2014). Os pesquisadores submeteram a gramínea à hidrólise termo-ácida, à técnica de dióxido de carbono supercrítico (scCO₂) e à uma combinação dos dois. Os pesquisadores observaram que altas concentrações de ácido resultavam em baixo rendimento de biogás, podendo-se supor que condições ácidas mais elevadas podem inibir a propagação de microrganismos metanogênicos, tornando o meio tóxico.

Em 2015, em um estudo colaborativo entre instituições da China e Estados Unidos, Wen et al. (2015) avaliaram o efeito do pré-tratamento microbiológico na biomassa do capim com três diferentes consórcios microbianos para a produção de metano. A produção máxima dos consórcios MC1, WSD-5 e XDC-2 foi de 259, 279 e 247 mL/gSV, respectivamente, que foi 1,39, 1,49 e 1,32 vezes superior ao rendimento dos controles sem tratamento.

Com vistas a aumentar o potencial de produção de metano do capim-elefante, Narinthorn, Choorit e Chisti (2019) utilizaram dois tipos de pré-tratamentos, a saber, alcalino e microbiológico, na biomassa da gramínea. O estudo, que partiu de uma colaboração entre instituições da Tailândia e Nova Zelândia, mostrou um aumento significativo de rendimento de CH₄ em cenários onde a planta passou por um tratamento prévio. Entretanto, quando

comparado ao tratamento alcalino, o tratamento microbiológico foi menos efetivo na deslignificação e no aumento da biodigestibilidade do capim-elefante, não sendo observada nenhuma vantagem adicional do tratamento biológico combinado com o alcalino sobre o alcalino sozinho.

Já Dussadee, Remaraj e Cheunbarn (2017) avaliaram, na Tailândia, a aplicação de tratamentos alcalino e térmico na biomassa do capim-elefante ensilado para a geração de biogás em reatores em batelada de bancada. Os resultados da pesquisa confirmaram que amostras pré tratadas com solução alcalina têm melhor rendimento que a gramínea ensilada não-tratada ou tratada apenas com água quente. Nessa condição, o capim teve uma produção de biogás de 179,38 L/kgSV, enquanto a gramínea fervida com água gerou 155,91 L/kgSV e a sem-tratamento 164,06 L/kgSV.

Para superar a hidrólise lenta, etapa limitante da digestão anaeróbia, Phuttaro et al (2019a) utilizaram cultura de microrganismo superior, redução de partícula e pré-tratamento de sonificação na biomassa do capim-elefante para a produção de biogás. Os autores encontram um aumento no rendimento de metano de 10 a 49% associado à utilização da cultura de microrganismo, de 62 % com relação ao tamanho e de 110% pela aplicação do pré-tratamento.

Na China, Huang et al (2019) analisaram a produção de biogás do capim-elefante hidrolisado. A gramínea foi utilizada como único substrato e nenhum material tampão ou nutriente foi adicionado. O capim foi submetido a um pré-tratamento químico com NaOH e a solução teve o pH ajustado para a faixa de 6-7. O experimento foi realizado em um biorreator de fluxo ascendente com 100 L de volume sob condições mesofílicas (37°C). O bagaço hidrolisado foi utilizado como substrato para a partida do sistema por aproximadamente uma semana. A pesquisa mostrou resultados satisfatórios, com remoção de DQO superior a 90 % ($91,3 \pm 2,0\%$) e pH estabilizado ($7,3 \pm 0,1$). A produção de biogás foi de $0,56 \pm 0,014$ m³/kg_{DQO consumida}, com 68,1% de CH₄ ($0,38 \pm 0,024$ m³/kg_{DQO consumida}).

Ainda no continente asiático, Kongjan et al. (2019), após pré-tratamento ácido na biomassa do capim-elefante, separaram a fração líquida da fração sólida. A parte líquida passou pelo processo da digestão anaeróbia sozinha, enquanto a fração sólida foi co-digerida com esterco de porco. Nesses cenários, os autores avaliaram fatores que influenciam a produção de metano, incluindo pH inicial, concentração de inóculo e relação C/N. O estudo mostrou uma produção de metano máxima de 621,31 mL_{CH₄}/L para o hidrolisado de capim

(fração líquida) com pH inicial de 8 e concentração de inóculo de 15 gSV/L, enquanto a co-digestão apresentou uma produção máxima de 630,05 mL_{CH₄}/L quando a razão C/N foi de 21,03.

Phuttaro et al. (2019b) utilizaram hidrólise hidrotérmica para melhorar o potencial de produção de CH₄ do capim-elefante em reatores em batelada e semi-contínuos. Nos reatores em batelada, o melhor rendimento (248,20 NmL CH₄/SV_{adicionado}) foi obtido a partir da biomassa tratada a 175°C (35% superior à biomassa não tratada por hidrólise hidrotérmica). Nos reatores semi-contínuos, a biomassa tratada a 200 °C à taxa de carga orgânica de 4 gSV/L.d resultou na falha do digestor. Dessa forma, os autores propuseram uma relação OLR_{solúvel}/OLR_{total} menor que 200 como critério operacional para um funcionamento efetivo do digestor alimentado com a biomassa pré-tratada.

Na Nigéria, a pesquisa se voltava para a busca por matérias-primas alternativas com vistas a substituir o esterco de vaca utilizado na produção de biogás. Visando a conversão efetiva do capim-elefante para gás, Mbachu, Igboanugo e Alukwe (2019) trataram a gramínea com uma solução de potássio O capim, inoculado com esterco de boi e pré-tratado com potássio, apresentou um biogás com alto teor de metano (64%), confirmando, portanto, a possibilidade de substituição do esterco bovino.

As pesquisas acerca do impacto de diversos tipos de tratamento continuaram avançando. Saritpongteeraka et al. (2020) investigaram na Tailândia os efeitos do pré-tratamento de hidrólise térmica por aquecimento convectivo (*convective hydrothermal pretreatment* - CHTP) e por micro-ondas (*microwave pretreatment* - MWP) na digestão anaeróbia de um híbrido do capim-elefante para a produção de metano. Os resultados mostraram que o tratamento com micro-ondas causou mais danos às células da planta e se mostrou mais eficaz. No entanto, o tratamento por aquecimento convectivo é a opção mais adequada, uma vez que o calor residual de uma usina de biogás ou o próprio biogás podem ser utilizados, ao contrário da eletricidade necessária para o MWP.

Após a aplicação de um pré-tratamento inovador na biomassa do capim-elefante, a saber, descompressão explosiva de nitrogênio, Rocha-Meneses et al. (2020) sugeriram que a concentração de metano é influenciada pela temperatura do pré-tratamento. O pré-tratamento consistiu no acondicionamento da amostra e 800 mL de água destilada em vaso de pressão constante (30 bar) e aquecido sob diferentes temperaturas. Os autores concluíram que o capim-elefante tem grande potencial para a produção de metano, podendo ser utilizado como

fonte alternativa de energia para o setor de transporte na Nigéria e em outros países ricos em gramíneas e proporcionar segurança energética para a população.

Uma outra rede de publicações avançou em pesquisas utilizando mais de um substrato na digestão anaeróbia. Os estudos foram motivados pela possibilidade de obtenção de uma relação C/N dentro dos limites ideais para a produção de metano.

Partindo do pressuposto que o pré-tratamento potencializa o rendimento de gás, Carvalho et al (2016) utilizaram uma combinação de procedimentos mecânico e termo-químico que consistiram na moagem do capim e posterior extração utilizando solução de hidróxido de sódio (NaOH) aquecida. Além disso, para evitar inibições no processo devido à elevada relação C/N do capim-elefante, os autores fizeram uso de lodo de uma estação de tratamento de efluentes como co-substrato na DA. O estudo foi realizado em condições mesofílicas ($37^{\circ} \text{C} \pm 0,2^{\circ} \text{C}$) em reatores contínuos (16 L) com tempo de detenção hidráulica de 15 dias. Foram feitos três ensaios com diferentes proporções de lodo de ETE e capim elefante pré-tratado: F0 (100:0, v/v), F1 (75:25, v/v) e F2 (50:50, v/v). Ao final dos 90 dias de experimento, a mistura F0 apresentou uma produção de biogás de 0,22 L/gSVT, sendo composto por 59% de biometano. Os ensaios F1 e F2 geraram 0,26 e 0,31 L/gSVT de biogás com porcentagem de 61,5% e 67,7% de metano, respectivamente. Os resultados experimentais obtidos mostraram que a co-digestão aumentou o rendimento de metano em 23% (F1) e 38% (F2) quando comparado com o cenário de referência (F0). A redução de matéria orgânica também foi mais acentuada nas misturas de lodo e capim-elefante, sendo de 55% (F0), 77% (F1) e 86% (F2).

Já Dussadee, Reansuwan e Ramaraj (2014) avaliaram a produção de biogás em escala real a partir da co-digestão anaeróbia da silagem de capim-elefante e esterco de porco. O gás obtido, após passar por tratamento para remoção de CO_2 e H_2S , foi comprimido e utilizado no abastecimento de carros na Tailândia. Os pesquisadores concluíram que a co-digestão dos substratos é uma abordagem promissora para a produção de biogás, tendo uma composição de 89,3% de CH_4 , 10,05% de CO_2 e 0,02% de O_2 após o tratamento do biogás.

Outra abordagem foi levantada na Tailândia por Prapinagsorn, Sittijunda e Reungsang (2017). Além da co-digestão, os autores avaliaram a técnica de bioaugmentação para a produção de metano. O capim-elefante co-digerido com esterco de gado e silagem de capim-elefante com esterco de gado apresentaram resultados promissores, tendo um rendimento máximo de

produção de CH₄ 179,59 e 208,11 mL CH₄/gSV_{adicionado} na co-digestão do capim e esterco e silagem do capim e esterco, respectivamente.

Ainda na Tailândia, Boonpiyo, Sittijunda e Reungsang (2018) avaliaram a produção de metano da co-digestão de capim-elefante com resíduos alimentares e da ensilagem do capim com resíduos alimentares. Os autores avaliaram diferentes proporções dos substratos, sendo o rendimento de metano obtido na proporção de 1:4 (gSV/gSV) para capim-elefante e resíduos alimentares e 3:2 (gSV/gSV) para silagem de capim-elefante para resíduos alimentares. Nessas condições, o rendimento máximo de metano foi de 411 e 362 mL_{CH4}/gSV, respectivamente. Assim, sob concentração ótima de substrato, o rendimento máximo de metano do capim-elefante e resíduos alimentares foi 1,14 vezes maior do que o de capim-elefante ensilado e resíduos alimentares.

Prapinagsorn, Sittijunda e Reungsang (2018) produziram biohidrogênio e metano em um processo de duas fases a partir da co-digestão de capim-elefante com esterco de vaca e da silagem do capim com esterco de vaca. Em uma primeira etapa, os autores avaliaram a produção de hidrogênio nos dois cenários de co-digestão, obtendo uma produção de hidrogênio de 6,98 mL_{H2}/gSV_{adicionado} na co-digestão de capim com esterco, e de 27,71 mL_{H2}/gSV_{adicionado} na co-digestão da silagem de capim com esterco. Posteriormente, o efluente hidrogenado e o resíduo sólido deixado após a fermentação com hidrogênio foram utilizados como substrato para a produção de metano. O cenário onde houve digestão de capim-elefante apresentou produção de 169,87 mL_{CH4}/gDQO_{adicionado}, enquanto sua silagem produziu 141,33 mL_{CH4}/gDQO_{adicionado}.

Foram localizados também diversos estudos que buscaram estabelecer condições ideais de produção de biogás a partir do capim-elefante. De forma geral, as pesquisas avaliaram a idade de colheita, digestibilidade das partes do capim, temperatura de incubação e efeitos da adição de nutrientes na digestão.

Nesse sentido, Surendra e Khanal (2015) estudaram o efeito da maturidade do capim, isto é, a idade da gramínea na produção de biogás sob diferentes regimes de peneiramento. Foram incubadas plantas colhidas com 2, 4, 6 e 8 meses e tamanhos de 6, 10 e 20 mm. Os autores chegaram a resultados semelhantes aos encontrados por Shiralipour e Smith (1984): as biomassas mais jovens, com idade aproximada de 2 meses, tiveram melhor rendimento de metano, com uma produção de 219 NmL/gSV_{adicionado}, e maior digestibilidade de celulose e hemicelulose. O estudo também mostrou uma variação de geração de gás a diferentes

tamanhos de partícula. Partículas menores, de 6 mm, apresentaram uma produção média de CH₄ de 178,75 NmL/gSV_{adicionado}, enquanto partículas de 10 e 20mm tiveram um rendimento médio de 156,25 NmL/gSV_{adicionado} e 147,50 NmL/gSV_{adicionado}, respectivamente.

No ano seguinte, Simbusthong, Sangsil e Sawanon (2016) corroboraram com os resultados apresentados anteriormente. Os autores avaliaram a produção de metano a partir do capim-elefante com diferentes idades de corte. Foram avaliadas plantas com 30, 45, 60 e 90 dias. O capim com idade aproximada de 60 dias mostrou melhores resultados, com uma produção anual por área de cultivo de 6.500m³ de CH₄.

Conclusões semelhantes foram obtidas por Chanpla et al. (2018) ao observarem o efeito da idade da colheita do capim-elefante na produção de biogás em um processo com separação fases. Os resultados mostraram que a biomassa do capim é modificada com o passar do tempo. A gramínea mais velha apresenta maior concentração de componentes de difícil degradação, como a lignina. A idade de corte ótima encontrada para a produção de biogás foi de 45 dias.

Nos Estados Unidos, Surendra et al. (2018) avaliaram a composição e digestibilidade anaeróbia de diferentes partes vegetais do capim-elefante, coletado em três locais e duas estações. A composição de biomassa e rendimento de metano variaram significativamente. Os autores observaram que o rendimento específico de metano era maior nas folhas (0,243 Nm³/kgSV_{adicionado}) do que nos caules (0,168 Nm³/kgSV_{adicionado}) e os teores de lignina, celulose e fibras estão correlacionados negativamente com o rendimento de CH₄.

No continente asiático, Suaisom, Pholchan e Aggarangsi (2019) avaliaram condições ideais para a produção de biogás a partir de duas variantes de capim-elefante em reator ABR. Os autores investigaram taxas de carga orgânica, esquemas de alimentação, adição de oligoelementos e taxas de recirculação. Os resultados mostraram que em altas taxas de recirculação de efluentes e de carga orgânica, o rendimento de metano decresce devido à deterioração da capacidade do reator em conter microrganismos. Ademais, o reator apresentou elevada estabilidade de desempenho no esquema de alimentação semi-contínua. A melhor condição para o ABR foi obtida em uma taxa de carga orgânica de 4,0 kg_{DQO}/m³.d, sob alimentação semi-contínua e taxa de recirculação de 0,5 %, tendo produzido 0,49 ± 0,05 Nm³/kgSV_{adicionado}.

Shilpi et al. (2019) avaliaram a influência da irrigação feita com efluentes de abatedouros e esgoto na produção de biomassa e no potencial bioquímico de metano (BMP)

de sete culturas energéticas, sendo elas beterraba, sacarina, alfafa, milho, cana gigante, capim-elefante, girassol e canola. A cana gigante apresentou melhor rendimento de biomassa, tendo uma produção de 22,3 t/ha. Quanto ao BMP, o melhor resultado foi apresentado pela biomassa de milho irrigada com efluente de abatedouro, com 793,56 NmL_{CH4}/gSV. A melhor produção de metano do capim-elefante foi observada quando a gramínea foi irrigada com efluente de abatedouro, tendo uma produção de biomassa de 15 t/ha e uma produção de metano de 110,00 NmL_{CH4}/gSV.

Já Thaemngoen et al. (2020), realizaram um estudo comparativo entre a digestão anaeróbia à seco de duas fases com diferentes circulações de lixiviados e o sistema de digestão anaeróbia úmida do capim-elefante. Os autores observaram que a frequência de circulação de lixiviados influenciou fortemente a taxa de hidrólise, melhorando a digestibilidade da fibra do capim. Quando a circulação do lixiviado aumentou de 1 para 4, o rendimento de metano cresceu em 32,5 %. Ainda assim, a produção de metano em um sistema úmido é de duas a três vezes maior que em sistemas secos devido à uma vantagem na transferência de massa em um sistema totalmente úmido.

No mesmo ano, Pardang et al. (2020) avaliaram os efeitos da silagem, da idade de colheita e da temperatura de incubação do capim-elefante para a produção de biogás. Como observado em estudos anteriores, as plantas mais jovens tiveram melhor rendimento devido ao menor teor de lignina. Quanto à ensilagem e temperatura, a gramínea ensilada tende a ter um desempenho superior à grama fresca em condições mesofílicas. Entretanto, sob condições termofílicas, foram obtidos rendimentos de metano específicos similares entre as duas formas da gramínea, sugerindo que os efeitos da digestão a altas temperaturas prevalecem sobre as vantagens do processo de ensilagem.

Na China, Wu et al. (2020) avaliaram o efeito de aditivos misto e fermentativo na qualidade da silagem, na comunidade microbiana e no rendimento de metano do capim-elefante. Os autores observaram que quanto maior o N-NH₃, hemiceluloses e ácido láctico, maior o rendimento específico de metano. Por outro lado, quanto maior o teor de lignina, menor a produção específica de metano. O melhor resultado de produção de metano foi obtido na condição em que a amostra de silagem foi tratada com aditivo fermentativo (334,69 ± 22,75 mL/gSV).

No período, estudos de viabilidade técnica-econômica e produção de biogás em escala plena começaram a avançar. Além disso, a possibilidade de produção energética em diferentes cenários utilizando partes do capim-elefante foi levantada.

No México, Gutierrez, Xia e Murphy (2016) avaliaram a viabilidade econômica da produção de biogás a partir de esterco suíno e capim-elefante. Os autores analisaram três cenários: a mono-digestão de esterco de porco em uma fazenda; a co-digestão do esterco suíno e silagem do capim-elefante em uma fazenda; a co-digestão do esterco de porco e capim-elefante em plantas de biogás centralizadas. As avaliações econômicas para os cenários onde houve digestão *in situ*, isto é, na fazenda, mostraram potencial de rentabilidade, com tarifas inferiores a \$US 0,12/kWh. Já nos sistemas centralizados, são necessárias tarifas de \$US 0,161/kWh a \$US 0,195/kWh.

Na Tailândia, Keeratiurai (2016) realizou a avaliação do custo econômico e o custo ambiental da produção de biogás a partir do capim-elefante, do capim estrela africana e do capim angola utilizando o modelo de Deming estendido. Para isso, o pesquisador analisou, por meio de modelagem, os custos e impactos de sete cenários distintos, que incluíam a área plantada com 100% de cada gramínea, plantações com 50% de uma espécie de capim e 50% de outra, e um último cenário onde as três espécies seriam cultivadas. O melhor resultado foi obtido no cenário em que 100 % da área estaria plantada com capim africano. Sob essas condições, o cultivo apresentou custo econômico de $2036 \pm 1,13$ baht. 10^3 /rai.dia, custo ambiental de $130,64 \pm 0,12$ baht. 10^3 /rai.dia. Embora não tenha sido o cenário mais sustentável e produtivo, o capim-elefante mostrou bons resultados, com custo econômico de $3529 \pm 0,85$ baht. 10^3 /rai.dia e custo ambiental de $226,7 \pm 0,11$ baht. 10^3 /rai.dia.

Em um estudo em escala real, Begum et al. (2020) avaliaram o desempenho de uma usina de biometanação de alta taxa com capacidade para tratar uma tonelada de resíduo por dia implantada em uma propriedade rural. A planta era composta por um tanque de preparação de 2 m³, reator anaeróbio de 55 m³, filtro de gravidade subterrâneo de 2 m³, balão de gás de 8 m³, compressor, separador de umidade, limpador de H₂S e um motor a biogás. O sistema era alimentado com a mistura de cama de aves, esterco bovino e capim-elefante na proporção de 1:1:1. A planta gerou 84,5 – 104 kWh/dia de energia elétrica a partir do biogás (65 a 80 m³/dia) contendo de 40 a 48 m³ de metano por dia, o que foi suficiente para cultivar, aproximadamente, 24.000 m² de terra utilizando a energia gerada para operar as bombas de água.

O continente norte-americano, representado pelos autores Sawatdeenarunat et al (2018), iniciou estudos sobre a utilização simultânea do capim-elefante como matéria-prima para a produção de biogás e produção de energia térmica. Os autores investigaram a digestão anaeróbia do capim-elefante em reatores em batelada de bancada durante 300 dias. O desempenho do reator era estável com uma alta taxa de carregamento orgânico ($6 \text{ kgSV/m}^3 \cdot \text{d}$). O digestato rico em fibra celulósica e lignina foi termoquimicamente convertido em biocombustíveis sólidos ricos em energia que poderiam ser utilizados para co-combustão com carvão em usinas elétricas descentralizadas com menos emissão de poluentes.

Em um estudo colaborativo entre Tailândia e Malásia, Suaisom et al. (2019) estudaram condições ótimas de condicionamento hidrotérmico para o capim-elefante visando a produção de fluido da prensa da gramínea para a produção de biogás. O capim foi tratado hidrotermicamente e depois mecanicamente prensado. O fluido da prensa foi utilizado no teste de potencial bioquímico de metano, enquanto a fração sólida foi armazenada para posterior uso como combustível sólido. As melhores condições de condicionamento foi tempo de colheita de 75 dias, proporção de capim e água de 1:6 (por peso), água em temperatura ambiente ($\approx 25^\circ\text{C}$) e tempo de molho de 355 minutos. Nesse cenário, o potencial de produção de metano do fluido do capim foi de $412,18 \text{ mL}_{\text{CH}_4}/\text{gSV}_{\text{adicionado}}$.

3.4. Conclusão

Ao longo da análise dos 117 artigos de pesquisa retornados pela base de dados *Scopus*, foi possível constatar padrões e tendências de pesquisas relacionadas à utilização do capim-elefante na geração de biogás e gás metano.

Percebeu-se que o grande impulsionador do tema é o continente asiático, em especial a Tailândia. O país detém o maior número de publicações, tendo colaborações com países como os Estados Unidos, China e Indonésia.

Por outro lado, embora tenha sido bastante cogitado como uma potencial fonte energética dada sua alta produção de biomassa e relativo bom rendimento de gás metano, a gramínea ainda é vista como uma planta forrageira. Grande parte dos artigos retornados tinham como objetivo buscar melhorias para alimentação e aproveitamento energético de ruminantes.

Nos últimos anos, no entanto, pesquisas relativas ao uso do capim como substrato para produção de combustíveis gasosos se tornaram mais presentes, a última década apresentado um significativo aumento nas publicações de artigos. Aparentemente, a aplicação de pré-tratamentos impulsionou as publicações, tendo em vista que são técnicas que ultrapassam as barreiras impostas pela hidrólise, tornando o processo mais viável.

No geral, os trabalhos foram realizados a nível de bancada, tendo sido localizado apenas dois estudos em escala plena. Esse dado evidencia o estágio inicial e a recente aplicação do capim-elefante como substrato na digestão anaeróbia e produção de biogás.

Os estudos avaliaram, em sua maioria, efeitos da idade de colheita da planta na geração de biogás, a digestão simultânea com diversos substratos para alcance de razão C/N ideal, e a aplicação de pré-tratamentos para tornar a biomassa do capim mais facilmente biodegradável.

As pesquisas mostraram que gramíneas mais jovens tendem a ter um melhor desempenho em termos de produção de CH₄ devido ao baixo teor de lignina. De acordo com os resultados observados, plantas com idade aproximada de 45 a 60 dias alcançam melhor produção de biogás.

No que cerne aos pré-tratamentos, a maior parte dos estudos aplicaram tratamentos alcalinos e biológicos. Os resultados acerca do tratamento com melhor rendimento divergiram, variando de acordo com o substrato que estava sendo co-digerido. Entretanto, pré-

tratamentos químicos, com adição de substâncias alcalinas, apresentaram melhor desempenho.

Destacaram-se ainda, conclusões acerca do processo de ensilagem e temperatura de incubação. Foi observado que, em condições mesofílicas, o capim ensilado tende a ter um melhor desempenho que o capim fresco. No entanto, em condições termofílicas, o desempenho das duas formas de capim foi semelhante, sugerindo que os efeitos da digestão a altas temperaturas prevalecem sobre as vantagens do processo de ensilagem.

Por oportuno, convém destacar que o estudo avaliou tão somente documentos publicados na base de dados *Scopus*. Conforme anteriormente relatado, existem diversas bases de dados, dentre as quais se destacam a *Scopus* e a *Web of Science*. Essas bases diferem em diversos aspectos, inclusive nos documentos que as compõe, sendo complementares, não excludentes. Desta foram, em trabalhos futuros, para um efetivo diagnóstico, sugere-se a avaliação de bases de dados distintas da utilizada no presente estudo.

Capítulo 4 : Potencial teórico de produção de energia a partir do biogás oriundo da co-digestão anaeróbia de silagem de capim-elefante e dejetos de diferentes criações de animais em Alagoas

4.1 Introdução

O Estado de Alagoas possui uma matriz energética essencialmente renovável. Quando avaliada a produção de energia primária, isto é, a energia diretamente encontrada na natureza (ex.petróleo, gás natural, hidráulica, lenha), mais de 81% da produção de Alagoas é oriunda de derivados da cana-de-açúcar e da energia hidráulica. No que tange à geração de energia elétrica, é evidente o domínio das centrais hidrelétricas, sendo elas responsáveis por 3.723,88 MW dos 4.074,82 MW de capacidade instalada do Estado (ALAGOAS, 2020).

Essa dependência por uma única fonte vulnerabiliza a segurança energética do Estado, uma vez que qualquer desequilíbrio que impacte nos processos produtivos acarreta uma iminente falta de abastecimento. No caso da energia hidráulica, as secas recorrentes, a degradação de rios e solos, as mudanças climáticas representam um grande risco para a produção elétrica (FREITAS E SOITO, 2010). Em Alagoas, especialmente, entre os anos de 2010 e 2019, foi registrado um decréscimo de 51,4% da produção elétrica. Esse fato se deu pela redução de chuvas na Bacia do Rio São Francisco que, conseqüentemente, resultou no decréscimo da energia produzida por hidrelétricas (ALAGOAS, 2020).

Resta evidente, assim, que não só é necessária – e urgente – a utilização de fontes limpas e renováveis. Para assegurar o fornecimento de energia elétrica para as gerações futuras, é preciso dar prioridade a uma matriz energética diversificada, com a introdução de distintas alternativas e matérias-primas.

Nesse sentido, a bioenergia, isto é, a geração de energia a partir da biomassa, mostra-se uma opção promissora (FERREIRA et al., 2018). Essa tecnologia, além de possibilitar o tratamento de materiais que seriam descartados, exige menor investimento quando comparada a alternativas como a energia eólica ou solar. Dentre as formas de bioenergia, destaca-se a produção de biogás dada a sua pouca sofisticação e bom rendimento energético (PARSAEE, KIANI E KARIMI, 2019).

Na pecuária, a modernização dos sistemas de criação, com alta concentração de animais confinados, preocupa pela enorme geração de resíduos que, além de possuir baixo valor comercial, é responsável por efeitos adversos em diversas categorias. À vista disso, a digestão anaeróbia e consecutiva produção de biogás tem sido considerada a melhor forma de

mitigar os impactos dos dejetos de animais, gerando energia e produzindo biofertilizante (FERREIRA et al., 2018; ESTEVES et al., 2019). No Brasil, a criação de animais confinados, especialmente aves, suínos e gados, tem um potencial significativo de produção de biogás, podendo gerar 13.452,96 GWh/ano (SENAI, 2016).

Os dejetos de animais são, tradicionalmente, utilizados como único substrato na digestão anaeróbia. Contudo, estudos mostraram que a mono-digestão, isto é, a digestão de somente um substrato de origem animal, pode não representar a forma mais eficiente de produção de biogás tendo em vista que há a possibilidade de desequilíbrio no processo causado pela relação C/N abaixo do valor ideal (SAWATDEENARUNAT et al., 2016; WANG et al., 2019).

Nesse contexto, a adição de uma cultura energética como o capim-elefante à digestão de dejetos de animais mostra-se como uma boa alternativa dada a possibilidade de obtenção de uma relação C/N dentro do intervalo ideal, potencializando assim a produção de biogás (PIÑAS et al., 2018). A utilização de dois ou mais substratos simultaneamente na digestão anaeróbia é conhecida como co-digestão e vem sendo amplamente aplicada pela comunidade científica. Os estudos comprovam que a técnica possibilita o aumento do rendimento de metano (CARVALHO et al., 2016; NING et al., 2019) e, considerando a produção de energia elétrica, os sistemas de co-digestão têm melhor desempenho quando comparados aos sistemas de mono-digestão devido, principalmente, ao menor tamanho do equipamento, menor consumo de energia e menor consumo de calor (PIÑAS et al., 2018).

No que tange à utilização do capim-elefante na digestão anaeróbia, estudos defendem o uso da gramínea como substrato em forma de silagem (DUSSADEE, REANSUWAN E RAMARAJ, 2014; PRAPINAGSORN, SITTIJUNDA E REUNGSANG, 2018). Quando se trata de produção de gás em escala plena, a silagem aparenta ser uma opção apropriada tendo em vista que pode ser facilmente armazenada, garantindo o abastecimento por um longo período (RÖSCH, AUST E JÖRISSEN, 2013). Ademais, pesquisas indicam que a silagem do capim-elefante tem melhor rendimento na produção de CH₄ quando comparado ao desempenho do capim sem o processo de ensilagem (BOONPIYO, SITTIJUNDA e REUNGSANG, 2018)

De acordo com Stecher, Brosowski e Thrän (2013), o potencial de produção de energias renováveis pode ser classificado em teórico, técnico e econômico. O potencial teórico se refere ao limite máximo disponível em uma determinada área por um determinado

período. Seu cálculo considera parâmetros físicos gerais como, por exemplo, a quantidade de energia resultante da fonte em questão dentro da região avaliada (RESCH et al., 2008; FEAM/MG, 2014).

Já o potencial técnico corresponde à parcela resultante do potencial teórico quando são subtraídas as perdas de energia através dos processos, limites das tecnologias de conversão e barreiras socioambientais. Por fim, o potencial econômico é a porção que é economicamente rentável, podendo também ser entendido como o total de energia que pode ser gerada sem a necessidade de apoio ou intervenções adicionais às existentes no mercado (STECHEER, BROSOVSKI E THRÄN, 2013; FEAM/MG, 2014). Dessa forma, o potencial teórico pode ser visto como uma avaliação prévia da viabilidade de aplicação de uma tecnologia de produção energética.

Em Alagoas, a produção do biogás mostra-se ainda pouco difundida. Segundo mapeamento realizado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis Biogás – CIBiogás (CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2020), o Estado não registra nenhuma planta em operação alimentada pelo biocombustível. Entretanto, diversos estudos acerca do tema vêm sendo realizados por grupos de pesquisa da região. De forma geral, os trabalhos avaliam o potencial de geração de biogás de substratos em oferta no Estado sob diferentes condições. Dentro os materiais mais utilizados, estão subprodutos da cadeia sucroalcooleira (IBRAHIM et al., 2017; MARAFON et al., 2020), manipueira (OLIVEIRA et al., 2017), além de dejetos de animais (BATISTA, 2014).

Entretanto, estudos que avaliem o potencial do Estado para produção de energia a partir do biogás ainda são escassos. O Atlas da Bioenergia (ALAGOAS, 2015) avaliou o potencial de produção de energia das biomassas disponíveis em Alagoas. Para as biomassas sólidas, o estudo considerou a conversão por combustão e, para efluentes líquidos, utilizou-se a produção de biogás. Nesse caso, apenas quatro substratos foram analisados: efluentes líquidos oriundos da manipueira, vinhaça, matadouros e laticínios. Até a presente data, não foram identificados estudos que avaliassem o potencial energético do Estado a partir da produção de biogás oriundos das principais criações do país, isto é, da bovinocultura, suinocultura e avicultura, considerando a co-digestão com uma cultura energética.

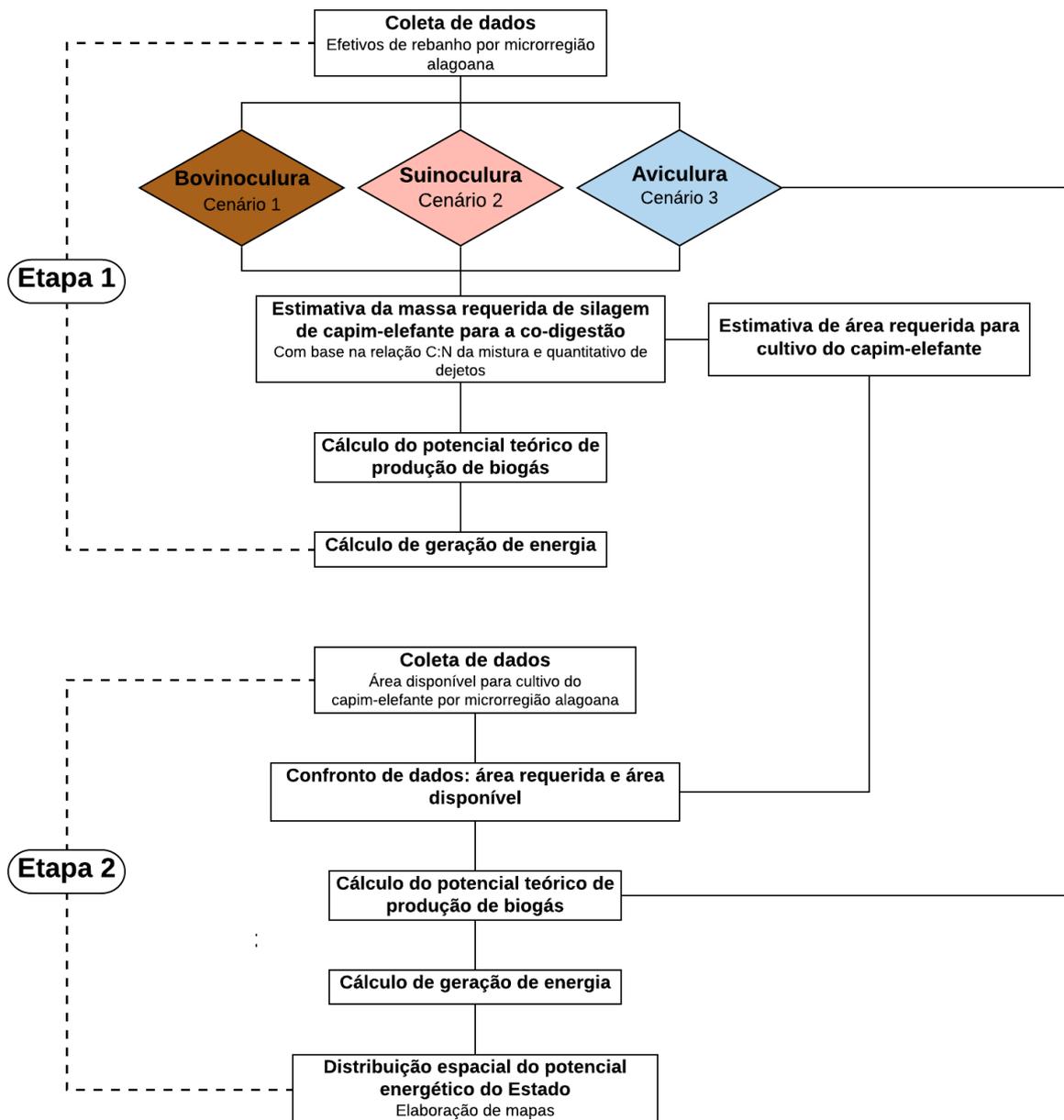
Nesse contexto, o presente trabalho realizou uma análise primária da viabilidade energética do biogás gerado a partir da co-digestão anaeróbia da silagem do capim-elefante e de dejetos de diferentes criações de animais no Estado de Alagoas, apontando a área com

maior potencial de produção. Para tal, foi avaliado o potencial teórico de produção de biogás e respectiva geração de energia em diferentes cenários. Ao final, espera-se que o estudo sirva como base para o desenvolvimento de pesquisas futuras, auxiliando o fomento de políticas públicas que visem a aplicação da tecnologia no Estado.

4.2 Metodologia

No presente estudo, foram analisados os potenciais teóricos de produção de biogás, e respectivo potencial energético, da co-digestão de silagem de capim-elefante e de dejetos de diferentes criações de animais nas microrregiões do Estado de Alagoas. O desenvolvimento do trabalho se deu conforme exposto na Figura 4.1.

Figura 4.1: Fluxograma da metodologia aplicada para estimativa do potencial energético.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O potencial energético do Estado a partir da co-digestão anaeróbia foi analisado em três cenários de substratos, sendo eles: (1) silagem de capim-elefante e dejetos da bovinocultura; (2) silagem de capim-elefante e dejetos da suinocultura; (3) silagem de capim-elefante e dejetos da avicultura.

Estudos revelam que, se tratando de resíduos agrícolas, as unidades geradoras não podem ser distantes do local de produção da biomassa devido aos custos associados ao transporte dos substratos (ALAGOAS, 2015). Por esse motivo, foi considerada a oferta de substrato em cada microrregião alagoana.

Na bovinocultura, foi computado apenas o quantitativo de vacas ordenhadas contido no IBGE devido ao modo de criação desses animais que, em geral, é feito em confinamento, o que facilita a coleta dos dejetos para a digestão anaeróbia. No Brasil, os animais de corte são criados majoritariamente soltos no pasto, o que inviabiliza o recolhimento dos excrementos. Quanto à suinocultura e avicultura, foram considerados os efetivos de suínos e galináceos constados no IBGE, respectivamente. Segundo classificação do Instituto, galináceos se referem a galos, galinhas, frangos, frangas e pintos.

No que cerne ao capim-elefante, foi considerado o potencial de produção de biogás de sua silagem. A escolha pela silagem se deu pela possibilidade de assegurar um fornecimento constante da matéria-prima durante o ano, tendo em vista que ela pode ser armazenada por esse período (PIÑAS et al., 2018).

Com o auxílio do programa *Excel*, foram estimados a produção teórica de biogás, e respectivo potencial energético, nas microrregiões do Estado de Alagoas nos três cenários de co-digestão. Nessa primeira etapa, foram considerados tão somente os efetivos de rebanho de cada microrregião, sendo o quantitativo de silagem de capim-elefante a ser utilizado calculado a partir da relação carbono/hidrogênio (C/N) da mistura.

Posteriormente, considerando a necessidade de disponibilidade dos dois substratos para evitar maiores custos de transporte, e que, possivelmente, nem todas as microrregiões do Estado possuem as características necessárias para cultivo da gramínea, os dados encontrados foram confrontados com as áreas disponíveis para plantio do capim-elefante.

Para isso, e dado a ausência de dados secundários consolidados acerca do cultivo do capim-elefante no Estado e as semelhanças agrônômicas do capim-elefante e da cana-de-

açúcar, foram extraídas informações referentes às áreas colhidas de cana-de-açúcar, segundo último Censo Agropecuário do IBGE.

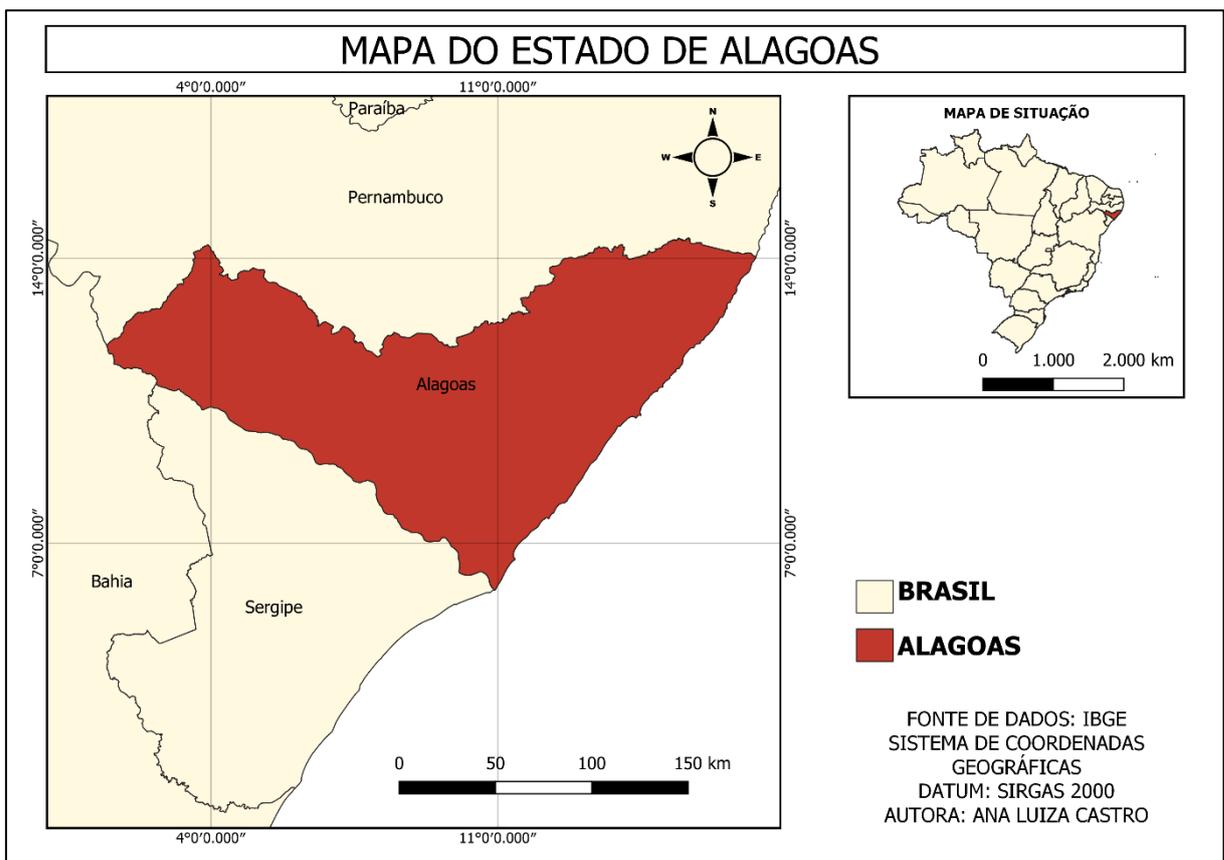
O resultado do confronto das áreas requeridas e áreas colhidas foi utilizado para o cálculo do efetivo potencial teórico de produção de biogás nas microrregiões alagoanas nos três cenários avaliados. Como produto, foram obtidos mapas de distribuição espacial desses potenciais energéticos confeccionados com o auxílio do programa QGIS.

Por fim, com vistas a identificar a área mais propícia para a produção de energia a partir do biogás nos três cenários, as microrregiões foram avaliadas individualmente, sendo observados os potenciais energéticos de cada município.

4.2.1 Caracterização da área

O Estado de Alagoas (Figura 4.2) está localizado na região Nordeste do Brasil, sendo limitado ao norte e oeste com o Estado de Pernambuco, ao sul com os Estados de Sergipe e Bahia, e a leste com o Oceano Atlântico. Possui uma população estimada de 3.365.251 habitantes, dividida em área que abrange 27.830,656 km² (IBGE, 2021).

Figura 4.2: Mapa de situação do Estado de Alagoas, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O clima do Estado é predominante tropical, com temperatura média variando de 21°C a 29°C. As chuvas são irregulares, apresentando a pluviosidade de 800 a 1200 milímetros anuais. Na região litorânea, as temperaturas são menos elevadas e registra-se maior volume de chuva. Já na zona ocidental, o clima é semiárido, com temperaturas que variam de 13 °C a 40 °C. Na região oriental, a temperatura alcança mínima de 19 °C e máxima de 28 °C (BANCO DO NORDESTE, 2015).

Seus 102 municípios são segmentados geograficamente em três mesorregiões (Sertão Alagoano, Leste Alagoano e Agreste Alagoano) e treze microrregiões (IBGE, 2021).

Para efeito desse estudo, as estimativas de produção de biogás e potencial energético foram realizadas por microrregião do Estado de Alagoas. A Tabela 4.1 apresenta os municípios alagoanos pertencentes a cada microrregião e suas respectivas mesorregiões.

Tabela 4.1: Municípios componentes das microrregiões e mesorregiões do Estado de Alagoas.

Microrregião	Mesorregião	Municípios
Alagoana do Sertão de São Francisco	Sertão Alagoano	Delmiro Gouveia, Olho D'Água do Casado e Piranhas
Arapiraca	Agreste Alagoano	Arapiraca, Campo Grande, Coité do Noia, Craíbas, Feira Grande, Girau do Ponciano, Lagoa da Canoa, Limoeiro de Anadia, São Sebastião e Taquarana.
Batalha	Sertão Alagoano	Batalha, Belo Monte, Jacaré dos Homens, Jaramataia, Major Isidoro, Monteirópolis, Olho D'Água das Flores e Olivença
Litoral Norte Alagoano	Leste Alagoano	Japaratinga, Maragogi, Passo de Camaragibe, Porto de Pedras e São Miguel dos Milagres
Maceió	Leste Alagoano	Barra de Santo Antônio, Barra de São Miguel, Coqueiro Seco, Maceió, Marechal Deodoro, Paripueira, Pilar, Rio Largo, Santa Luzia do Norte e Satuba
Mata Alagoana	Leste Alagoano	Atalaia, Branquinha, Cajueiro, Campestre, Capela, Colônia Leopoldina, Flexeiras, Jacuípe, Joaquim Gomes, Jundiá, Matriz de Camaragibe, Messias, Murici, Novo Lino, Porto Calvo e São Luís do Quitunde
Palmeira dos Índios	Agreste Alagoano	Belém, Cacimbinhas, Estrela de Alagoas, Igaci, Maribondo, Mar Vermelho, Minador do Negrão, Palmeira dos Índios, Paulo Jacinto, Quebrangulo e Tanque d'Arca
Penedo	Leste Alagoano	Feliz Deserto, Igreja Nova, Penedo, Piaçabuçu e Porto Real do Colégio
Santana do Ipanema	Sertão Alagoano	Carneiros, Dois Riachos, Maravilha, Ouro Branco, Palestina, Pão de Açúcar, Poço das Trincheiras, Santana do Ipanema, São José da Tapera e Senador Rui Palmeira
São Miguel dos Campos	Leste Alagoano	Anadia, Boca da Mata, Campo Alegre, Coruripe, Jequiá da Praia, Junqueiro, Roteiro, São Miguel dos Campos e Teotônio Vilela
Serrana do Sertão Alagoano	Sertão Alagoano	Água Branca, Canapi, Inhapi, Mata Grande e Pariconha
Serrana dos Quilombos	Leste Alagoano	Chã Preta, Pindoba, Ibataguara, Santana do Mundaú, São José da Laje, União dos Palmares e Viçosa
Traipu	Agreste Alagoano	Traipu, Olho d'Água Grande e São Brás

Fonte: Adaptado de IBGE (2021).

4.2.2 Coleta de dados

As informações necessárias para a construção desse estudo foram obtidas por meio da coleta de dados secundários utilizando a plataforma do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e através de conceitos consolidados da literatura.

Os efetivos de bovinos (vacas ordenhadas), suínos e galináceos foram extraídos da Pesquisa de Pecuária Municipal – PPM do IBGE referentes ao ano de 2019. A PPM é tida

como a principal fonte de estatísticas sobre os quantitativos das espécies animais e dos produtos da pecuária. Para construção da pesquisa, esses dados são obtidos mediante consulta a entidades públicas e privadas, produtores, técnicos e órgãos ligados direta ou indiretamente à produção, comercialização, industrialização, fiscalização, fomento e assistência técnica à agropecuária (OLIVEIRA, 2019).

Para a estimativa do quantitativo de dejetos gerados por dia, foram utilizados valores de produção média diária propostos por Oliveira (1993), conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Estimativa de geração diária de dejetos em kg por animal.

Unidade	Bovinos	Suínos	Galináceos
kg/animal/dia	12,5	2,35	0,15

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para estimativa prévia do quantitativo de silagem do capim-elefante a ser co-digerido, utilizou-se como base a relação entre carbono e nitrogênio da mistura.

A avaliação da razão C/N é indispensável para obtenção de um ótimo rendimento de biogás. Na prática, uma relação que varie de 20 a 30 é ideal para a digestão anaeróbia. Valores acima desse intervalo implicam em baixo teor de nitrogênio e excesso de carbono, levando a um rápido consumo do nitrogênio pelos microrganismos e a uma menor eficiência no processo. Por outro lado, em uma razão C/N baixa, onde há uma elevada probabilidade de acúmulo de amônia, é possível que ocorra um súbito aumento do pH e consequente inibição dos microrganismos metanogênicos (SAWATDEENARUNAT et al., 2016; HUANG et al., 2016; MUTHUDINESHKUMAR E ANAND, 2019). Isto posto, para o cálculo da fração em massa de silagem de capim-elefante a ser utilizada, adotou-se o valor de razão C/N igual a 25.

Assim, tendo em mãos a estimativa de geração de dejetos animais e definido o valor da relação C/N da mistura, a quantidade em massa de silagem do capim-elefante requerida foi obtida a partir da Equação 4.1.

$$K = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2}{N_1 \times Q_1 + N_2 \times Q_2} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Em que:

K = C/N da mistura de substrato

C_i = Percentual de carbono orgânico contido no substrato

N_i = Percentual de nitrogênio contido no substrato

Q_i = Massa do substrato expressa em kg

Os valores adotados de carbono e nitrogênio de cada substrato foram obtidos após a análise de pesquisas publicadas acerca do tema. A Tabela 4.3 traz à luz os dados utilizados para construção do presente estudo.

4.2.3 Estimativa de produção de biogás

A produção diária de biogás a partir de dejetos dos animais e da silagem do capim-elefante foi estimada tendo como base o rendimento médio dos substratos individualmente.

Para avaliação do potencial de geração de gás dos dejetos, considerou-se os fatores de conversão estimados por Kunz e Oliveira (2006). Já para o cálculo da produção de biogás oriunda da silagem do capim-elefante, foram utilizados valores de Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Rendimento Específico de CH_4 relatados na literatura.

A estimativa de produção diária de biogás das misturas foi realizada com base em metodologia proposta por Piñas et al. (2018). Para tal, foram consideradas as produções médias de cada substrato e a respectiva fração de massa a ser utilizada, como mostra a Equação 4.2.

$$PB_T = PB_1X_1 + PB_2X_2 \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde:

PB_t = Produção estimada de biogás da mistura (m^3/dia)

PB_1 = Produção estimada de biogás do esterco (m^3/dia)

PB_2 = Produção estimada de biogás do capim-elefante (m^3/dia)

X_1 = Fração em massa de esterco (kg)

X_2 = Fração em massa do capim-elefante (kg)

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros utilizados para a estimativa da produção de biogás nos três cenários.

Tabela 4.3: Parâmetros utilizados para o cálculo de potencial de produção de biogás.

Parâmetros	Unidade	Bovinos	Ref.	Suínos	Ref.	Galináceos	Ref.	Silagem de capim-elefante	Ref.
Sólidos Totais	%	-		-		-		23,52	Saritpongteera ka et al. 2020.
Sólidos Voláteis	%	-		-		-		24,3	Saritpongteera ka et al. 2020.
Rendimento específico de CH ₄	mLCH ₄ /g SV	-		-		-		193	Boonpiyo et al., 2018.
Fator de conversão de dejetos em biogás	m ³ /kg	0,038	Kunz e Oliveira, 2006.	0,079	Kunz e Oliveira, 2006.	0,05	Kunz e Oliveira, 2006.	-	
Carbono	%	16	Awais et al., 2016.	33,17	Kongjan et al., 2019.	25,02	Werayutsi l et al., 2016.	46,18	Boonpiyo et al., 2018.
Nitrogênio	%	1	Awais et al., 2016.	2,23	Kongjan et al., 2019.	3,04	Werayutsi l et al., 2016.	0,92	Boonpiyo et al., 2018.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2.4 Conversão energética

A conversão energética ocorre quando um tipo de energia é transformado em outro. No caso do biogás, a energia química presente em suas moléculas é convertida em energia mecânica por meio de um processo de combustão controlada. Posteriormente, essa energia mecânica ativa um gerador, convertendo-a assim em energia elétrica (COELHO et al., 2006).

Isto posto, para a obtenção do potencial elétrico, é necessário calcular primeiramente a quantidade de energia química contida no biogás. Para tanto, além da quantidade estimada de geração de biogás, considera-se o seu poder calorífico inferior, segundo Equação 4.3.

$$GEB = PB_t \times PCI_{biogás} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

GEB = Quantidade de energia do biogás (kcal/dia)

PB_t = Produção estimada de biogás (m³/dia)

PCI_{biogás} = Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m³)

Sabe-se, no entanto, que o poder calorífico inferior do biogás varia de acordo com o percentual de CH₄ e CO₂ contido, à medida que, quanto maior o teor de metano presente no gás, maior será seu poder calorífico (DE SOUZA E ASSOCIADO, 2016). A adoção de um valor para o poder calorífico inferior do biogás na estimativa do quantitativo de energia pode gerar resultados distintos do real, uma vez que, além de CH₄ e CO₂, o biogás possui outros componentes em menor quantidade.

Assim, considerando que o CH₄ é o responsável pela energia contida no biogás, para efeito desse estudo, utilizou-se a energia gerada pelo gás metano para o cálculo da energia térmica do biogás, conforme descrito na Equação 4.4. Para tal, foi adotado o valor de 8.491,87 (35,53MJ/m³) kcal/m³ para o PCI_{CH₄} (ALAGOAS, 2015).

A digestão anaeróbia produz biogás com teor de metano em torno de 50% a 70% (PRADO, CAMPOS.E SILVA, 2010). Assim, foi admitido o teor de 0,65 de CH₄ em todos os cenários avaliados.

$$GEB = (PB_{biogás} \times t_{CH_4}) \times PCI_{CH_4} \quad (4.4)$$

Em que:

t_{CH_4} = Teor de metano no biogás (0,65)

PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior do metano (kcal/m³)

Existem diversas tecnologias para conversão energética do biogás, sendo as mais utilizadas a turbina a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo-Otto (COELHO et al, 2006). De modo geral, os motores possuem menor custo tendo em vista que não é necessário a utilização de sistemas de purificação de gás.

Nesse estudo, foi considerado o uso de um motor com ciclo Otto. Conforme literatura, esse tipo de motor apresenta eficiência de 20% a 30% (DE SOUZA E ASSOCIADO, 2016). No que tange ao gerador, sabe-se que geradores apropriados para essa máquina possuem um rendimento que varia de 85 a 90%.

Assim, adotando uma eficiência da tecnologia igual 30% e um rendimento do gerador igual a 87%, o potencial elétrico do biogás em kW foi obtida a partir da Equação 4.5:

$$PE_{biogás} = \frac{GEB \times 4,1848 \times \eta_{tec} \times \eta_{gerador}}{86400} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde:

$PE_{\text{biogás}}$ = Potencial elétrico do biogás (kW);

4,1848 = Fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

η_{tec} = Rendimento da tecnologia (microturbina, turbina ou motor de combustão interna);

η_{gerador} = Rendimento do gerador (30%);

86.400 = Fator de conversão de dias para segundos.

4.2.2 Estimativa de área disponível para plantio

A co-digestão anaeróbia pressupõe o uso de dois ou mais substratos. Assim, para estimar o potencial de geração de bioeletricidade a partir da CODA em uma região, é razoável considerar o potencial de produção de todos os materiais que serão digeridos. De acordo com Stecher, Brosowski e Thrän (2013), o potencial da área é uma variável crítica na determinação da quantidade de matéria-prima, uma vez que grandes potenciais de área podem levar a grandes potenciais de culturas energéticas.

À vista disso, e considerando que, possivelmente, o desenvolvimento do capim-elefante não é exequível em todo o Estado, posteriormente foi avaliada as áreas passíveis de plantio da gramínea para o cálculo do potencial energético.

Não foram identificados, entretanto, dados secundários consolidados acerca do cultivo do capim-elefante em Alagoas. Possivelmente, isso se deve ao fato de a cultura não ser fortemente difundida no Estado, não significando, necessariamente, que a região não possua características que permitam o seu cultivo.

Segundo Carvalho (2014), o capim-elefante adapta-se a diferentes tipos de solo, tendo desempenho potencializado em solos com capacidade de reter umidade. No entanto, possui pouca tolerância a solos mal drenados e encharcados. Quanto à precipitação, pode ser cultivado em regiões com precipitação de 800 a 4000 mm, vegeta em regiões quentes e úmidas com precipitação anual de mais de 1000 mm, apresentando baixa tolerância à seca. Pode ser cultivado em regiões com temperatura média de 18 a 30°C, sendo a temperatura ótima 24 °C.

As características agronômicas do capim-elefante assemelham-se às de uma gramínea historicamente bem propagada na região, a cana-de-açúcar. Assim como o capim-elefante, a cana-de-açúcar se desenvolve bem em regiões de clima tropical, quente e úmido, com temperatura entre 19°C e 32°C, e precipitação acima de 1000 mm (MURIANA et al., 2013). O plantio dessas gramíneas ocorre de forma semelhante, exigindo poucos adicionais para o crescimento (SCHOLL et al., 2015). De acordo com Alagoas (2015), o cultivo do capim-elefante pode ser realizado inclusive no período de entressafra da cana-de-açúcar, aumentando a disponibilidade de matéria-prima em escala industrial.

Conforme Silva et al. (2015), Alagoas é o Estado com a maior produção de cana-de-açúcar no Nordeste, sendo essa a cultura com maior expressão na região. Assim, por ser uma das referências da economia do Estado, vastos são os dados relativos ao cultivo da cana-de-açúcar em Alagoas. Isto posto, para efeito desse estudo, utilizou-se as áreas colhidas de cana-de-açúcar no Estado. Os dados foram extraídos do Censo Agropecuário do IBGE relativo ao ano de 2017. Considerou-se as áreas supracitadas como regiões passíveis de cultivo do capim-elefante.

Para conversão da área colhida em toneladas de silagem do capim-elefante, foi considerado que cada tonelada da gramínea necessita de 40 hectares para cultivo (PIÑAS et al., 2018). Da mesma forma, a massa de silagem requerida conforme cálculo do efetivo de rebanho e relação C/N igual a 25, foi convertida em área requerida (hectares). Os dois dados foram então confrontados.

Por fim, dispondo da área requerida anteriormente calculada e da área com potencial de cultivo de capim-elefante, foram construídos mapas das microrregiões alagoanas com o efetivo potencial energético do Estado nos três cenários de co-digestão avaliados.

4.3 Resultados e discussão

Foram expostos neste item os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia acima descrita. Os produtos apresentados serão o potencial teórico de produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia da silagem do capim-elefante e das três principais criações de animais das microrregiões alagoana, e seus respectivos potenciais de conversão em energia elétrica.

Posteriormente, os resultados obtidos foram confrontados com a capacidade de produção de capim-elefante de cada microrregião a fim de se obter o real potencial energético

do biogás no Estado a partir dos três cenários avaliados, sendo a distribuição espacial dos potenciais expostas através de mapas.

4.3.1 Etapa 1: Potencial energético do Estado de Alagoas a partir da co-digestão anaeróbia da silagem do capim-elefante e dejetos de diferentes criações de animais considerando os efetivos de rebanho.

Utilizando a Equação 4.2, foi calculado o potencial teórico de produção de biogás a partir da co-digestão da silagem do capim-elefante e das três criações de animais em todas as microrregiões do Estado. Posteriormente, foi estimado o potencial energético do biogás a partir das co-digestões anaeróbias.

Nessa etapa, considerou-se que todo o Estado possuía igual potencial de plantio e colheita do capim-elefante, não sendo observado se as características das regiões eram condizentes com as características agronômicas da gramínea.

De acordo com os cálculos realizados, considerando os três cenários analisados e o ano de referência, o Estado de Alagoas possui capacidade de produção de aproximadamente 190 milhões de m³ de biogás ao ano, resultando em um potencial elétrico de 36.633,15 kW. O cenário onde a silagem do capim-elefante foi co-digerida com dejetos de galináceos apresentou o maior potencial de produção de biogás. Sob essas condições, Alagoas tem um potencial elétrico estimado de 18.676,43 kW, resultante de um potencial de geração de biogás de mais de 97 milhões de m³/ano. Nas co-digestões com dejetos de bovinos e suínos, chegou-se a um quantitativo energético de 14.438,72 kW e 3.518,00 kW, e 75 milhões e 18 milhões de m³ de biogás/ano, respectivamente.

Se considerássemos um sistema com operação em 95% do tempo, totalizando, assim, 8.322 horas de operação ao ano (ALAGOAS, 2015), o potencial de produção de energia elétrica do Estado seria de 304 GWh/ano. Desses, 155 GWh/ano seria oriundo do Cenário 3, enquanto 120 GWh/ano seria da co-digestão da silagem do capim-elefante e dejetos da bovinocultura. Apenas 29 GWh/ano seria resultante do cenário onde houve digestão de dejetos da suinocultura.

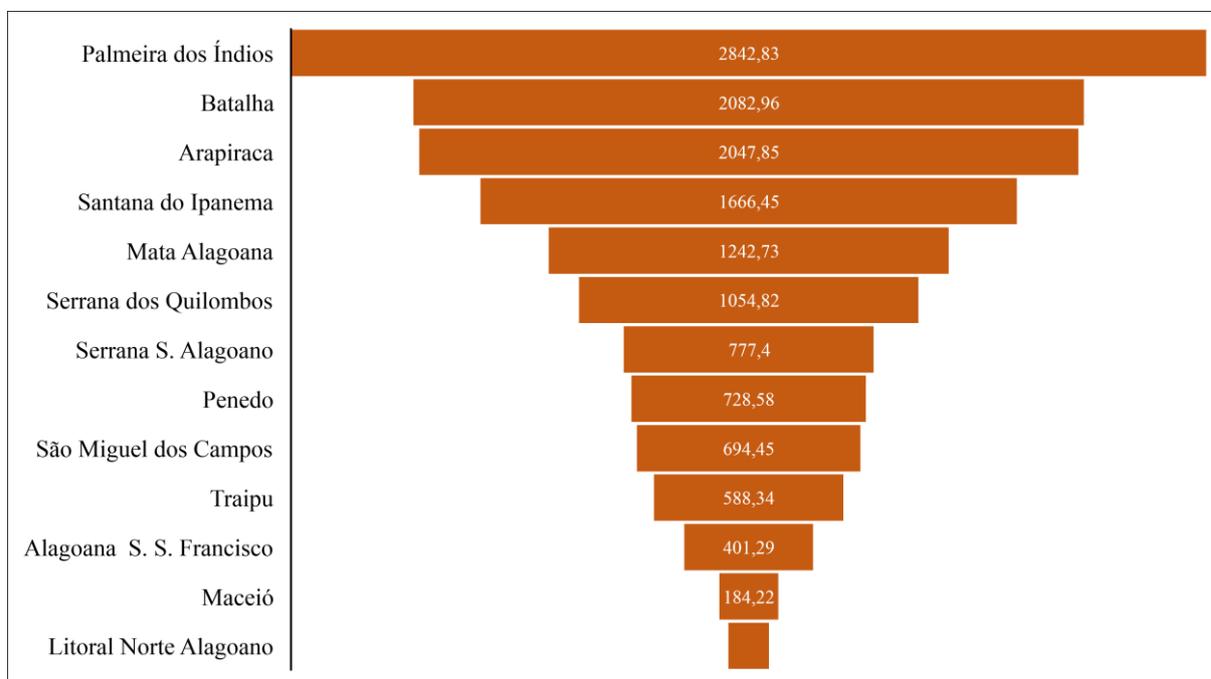
De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica, no ano de 2019, Alagoas teve um consumo energético total de 4.576 GWh (BRASIL, 2020). A co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos da avicultura poderia então suprir aproximadamente 3,40% da demanda do Estado, enquanto os Cenários 1 e 3 forneceria cerca de 2,62% e 0,63% do requerido.

No que tange aos potenciais de produção por microrregião, notou-se um padrão de maior e menor rendimento em todos os cenários. Arapiraca, Serrana dos Quilombos e Palmeira dos Índios, nessa ordem de produção, apresentaram maior potencialidade. Juntas, essas microrregiões representaram mais de 55% da soma dos potenciais elétricos nas três situações.

Já as microrregiões Maceió, Litoral Norte Alagoano e Alagoana do Sertão de São Francisco e Traipu, apresentaram os menores rendimentos. Esse resultado pode ser justificado tanto pelo número reduzido de municípios componentes, como ocorre em Alagoana do Sertão de São Francisco e Traipu; como pelo foco de produção em outras culturas e desenvolvimento econômico em outros setores.

No Cenário 1, Palmeira dos Índios apresentou melhor desempenho, tendo potencial elétrico estimado em 2.842,83 kW e 14.873.340,51 m³ de biogás no ano base. Destacaram-se ainda Batalha, com 2.082,9 kW e 10.897.767,76 m³ de biogás, e Arapiraca com 2.047,85 kW e 10.714.112,76 m³ de biogás. Na Figura 4.3 é possível observar os potenciais energéticos calculados por microrregião do Estado no Cenário 1.

Figura 4.3: Potenciais energéticos (kW) por microrregião alagoana no Cenário 1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

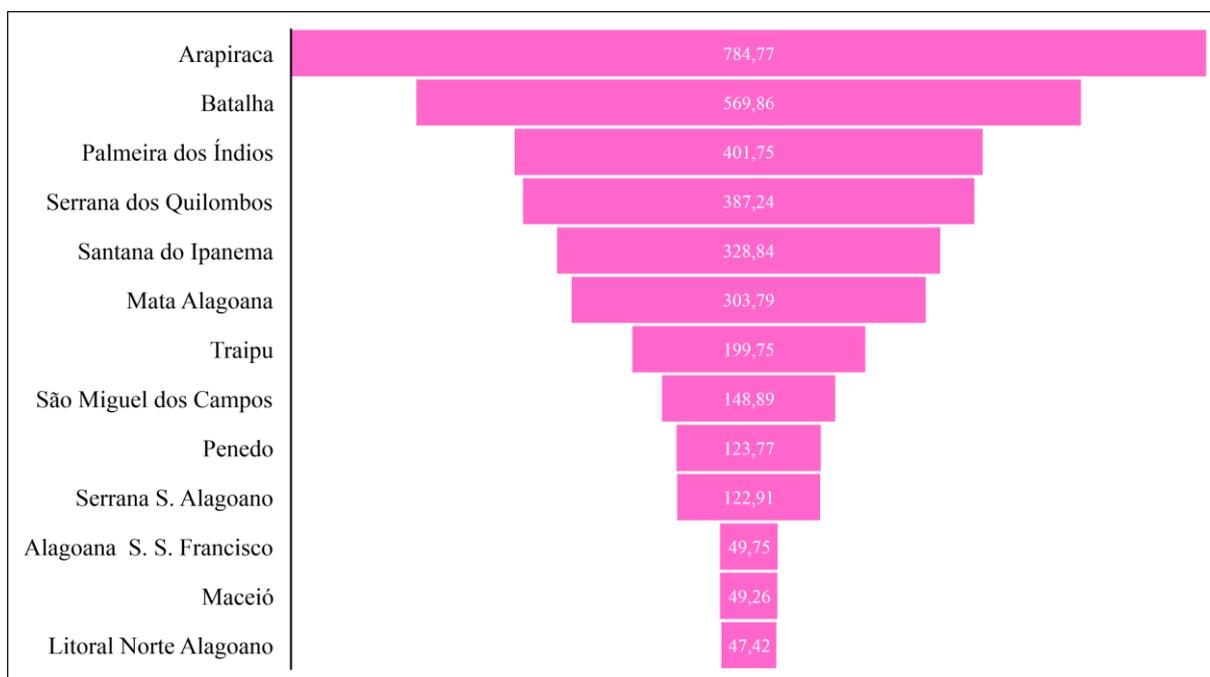
Vale destacar que a maioria dos municípios componentes dessas regiões integram a região da Bacia Leiteira e Polo Leiteiro de Alagoas. Dessa forma, o resultado obtido mostra-

se razoável tendo em vista que foram considerados os efetivos de vaca ordenhada para a estimativa da produção energética.

A tendência encontrada de maiores e menores potenciais energéticos mostra-se análoga ao resultado obtido por Alagoas (2015). Os autores elaboraram mapas de potencial energético de diversos produtos constituintes da cadeia alagoana, dentre eles, os resíduos oriundos da indústria de laticínios. O mapa aponta uma maior produção nas regiões de Serrana de Quilombos, Palmeira dos Índios, Batalha e Santana do Ipanema. Os menores rendimentos foram encontrados na região que abrange o Litoral Norte Alagoano a Penedo, o que se assemelha ao cenário obtido.

Já no Cenário 2, Arapiraca se sobressaiu, com potencial estimado de 784,77 kW e 4.105.836,52 m³ de biogás. O segundo melhor desempenho foi observado em Batalha (569,86 kW e 2.981.411,77 m³ de biogás), seguido por Palmeira dos Índios com 401,75 kW e 2.101.901,07 m³ de biogás (Figura 4.4).

Figura 4.4: Potenciais energéticos (kW) por microrregião alagoana no Cenário 2.

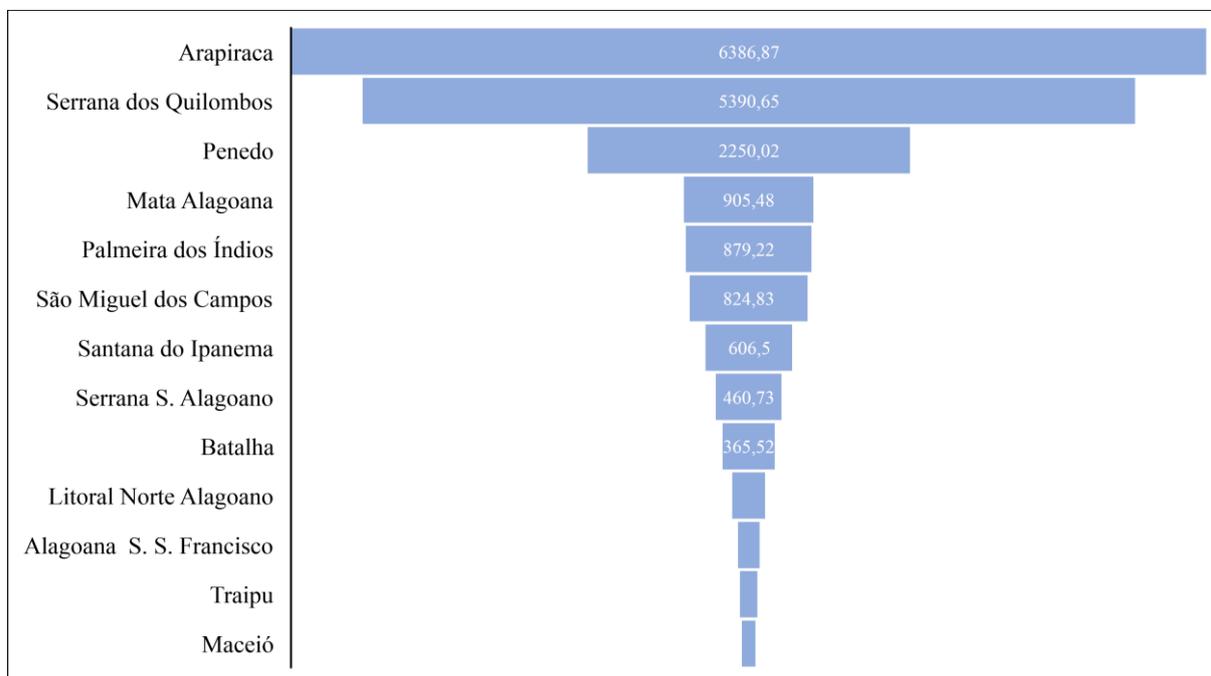


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O Cenário 3 apresentou a maior disparidade dentre as situações avaliadas, estando 75% da capacidade energética do Estado concentrada em três microrregiões: Arapiraca, Serrana do Quilombos e Penedo. Nessas, a produção de biogás e potencial elétrico estimados foram de

33.415.331,91 m³ e 6.386,87 kW, 28.203.196,97 m³ e 5.390,65 kW, e 11.771.848,83 kW e 2.250,02 m³ (Figura 4.5).

Figura 4.5: Potenciais energéticos (kW) por microrregião alagoana no Cenário 3.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2 Etapa 2: Potencial energético do Estado de Alagoas a partir da co-digestão anaeróbia da silagem do capim-elefante e dejetos de diferentes criações de animais considerando os efetivos de rebanho e capacidade de produção de capim-elefante.

Conforme relatado no tópico anterior, considerando tão somente os efetivos de rebanho das regiões e estimando o quantitativo de silagem de capim-elefante a partir da relação C/N, Alagoas possuiria capacidade de produção de aproximadamente 190 milhões de m³ de biogás ao ano, resultando em um potencial elétrico de 36.633,15 kW. Para tal, seria necessária a produção de mais de 1.800.000,00 toneladas de silagem de capim-elefante ao ano, requerendo uma área de mais de 45.000 hectares para o plantio.

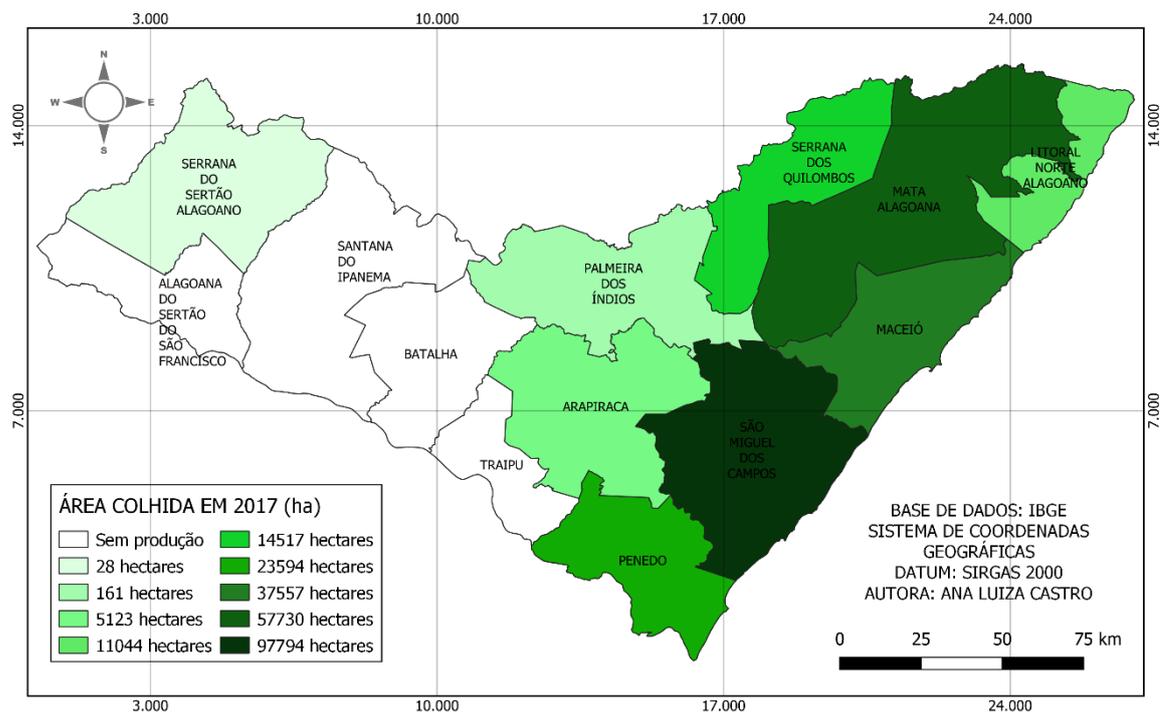
Dados do IBGE referentes aos quantitativos de colheita de cana-de-açúcar no ano de 2017 indicam que o Estado possui potencial de produção em uma área que abrange 247.548 hectares. Ainda que a área requerida para o plantio do capim-elefante seja inferior à área total colhida no Estado em 2017, quando a avaliação parte do pressuposto de produção de cada microrregião, o estudo de potencial bioelétrico realizado mostra-se divergente da realidade.

Isso se deve ao fato das concentrações de cana colhida e efetivos de rebanho entre as regiões serem contrários.

De modo geral, as regiões que possuem maior potencial de geração de cana-de-açúcar e, portando, para efeito desse estudo, de capim-elefante, não apresentam um efetivo de rebanho significativo, tendo, a partir dos cálculos realizados, baixa quantidade de capim requerida. De maneira oposta, as regiões onde há alto efetivo de rebanho, e, por conseguinte, maior demanda de área colhida de capim, aparentam possuir baixo ou, até mesmo, nenhum potencial de geração de capim-elefante.

A Figura 4.6 apresenta o quantitativo de áreas colhidas de cana-de-açúcar nas microrregiões do Estado de Alagoas no ano de 2017. Percebe-se um maior potencial de produção nas microrregiões que englobam o Leste Alagoano, com destaque para as regiões de São Miguel dos Campos, Mata Alagoana e Maceió.

Figura 4.6: Área colhida em hectares de cana-de-açúcar por microrregião alagoana no ano de 2017.



Fonte: Adaptado de IBGE (2017).

Já as microrregiões componentes do Sertão Alagoano, em sua maioria, não apresentaram produção. Conforme Barros et al. (2012), essa região apresenta condições semiáridas, com clima seco e quente, e precipitação pluviométrica média anual entre 400 mm e 600 mm. Conforme anteriormente declarado, o capim-elefante possui baixa tolerância à

seca, podendo ser cultivado em regiões com precipitação média acima de 1000 mm, média superior à observada no Sertão Alagoano.

Diante disso, o potencial do Estado anteriormente calculado sofreu uma redução aproximada de 64%, passando de 36.633,15 kW para 13.152,36 kW no ano base. Em um sistema operando em 95% do tempo, sob essas circunstâncias, Alagoas teria capacidade de produzir 109,45 GWh/ano somando os três cenários, podendo suprir cerca de 2,4 % da demanda energética. Desses, 37,10 GWh/ano seriam oriundos do Cenário 1, 11,76 GWh/ano do Cenário 2 e 60,59 GWh/ano Cenário 3.

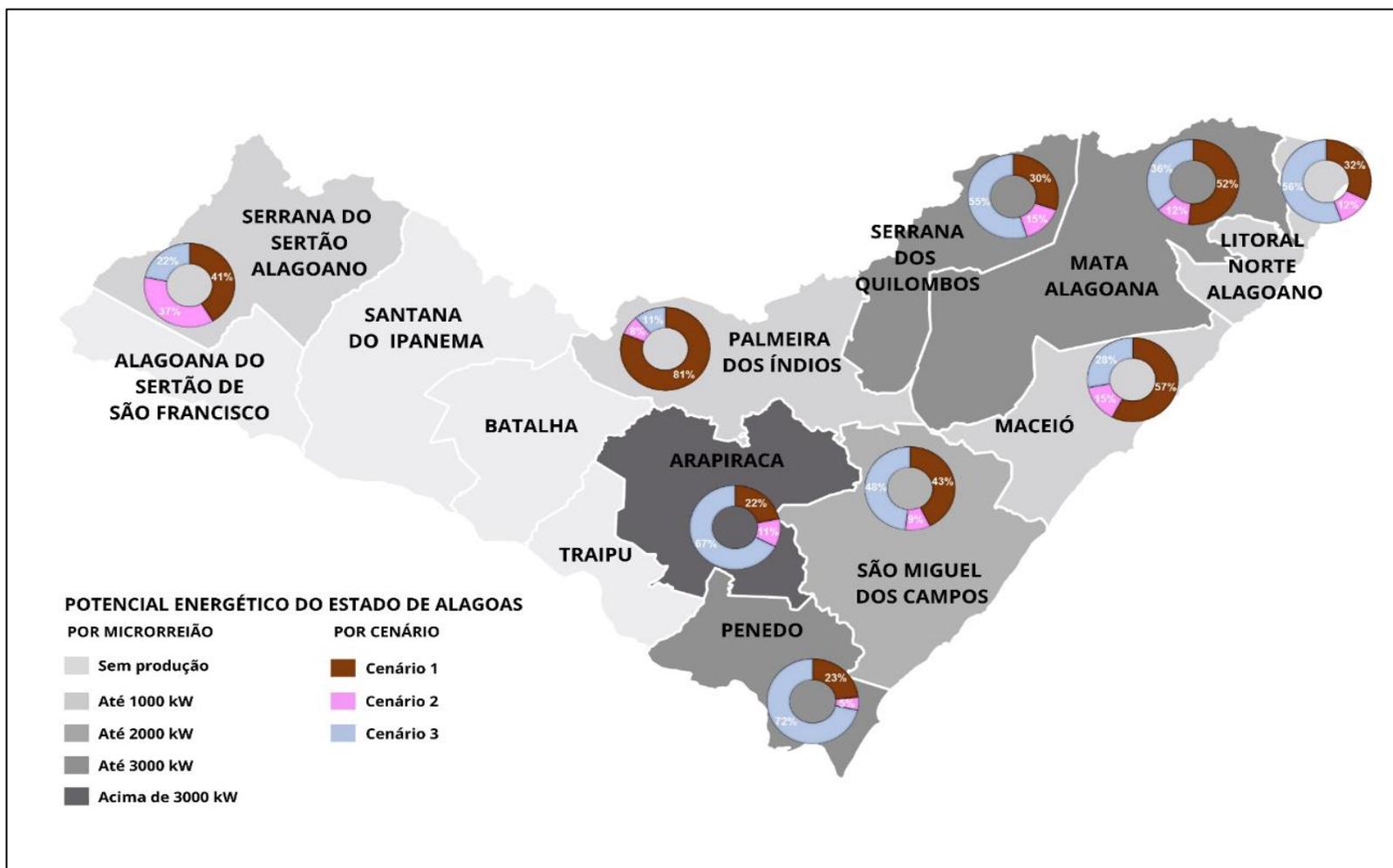
Quando comparada ao cenário nacional, a estimativa de produção de energia do Estado de Alagoas calculada mostra-se pouco representativa. Em estudo realizado pelo SENAI para avaliar as potencialidades do biogás no Paraná, foi mostrado que o Estado possui potencial para geração de 911 GWh/ano, 534 GWh/ano e 400 GWh/ano a partir da mono-digestão anaeróbia de dejetos de aves, suínos e vacas ordenhadas, respectivamente. A análise abrangeu ainda o quantitativo de produção do Brasil, chegando a um total de 4.040,05 GWh/ano, 3.759,32 GWh/ano e 5.653,59 GWh/ano para os mesmos materiais (SENAI, 2016). Em Minas Gerais, o potencial teórico encontrado foi de 11,33 GWh/ano para a mono-digestão de dejetos bovinos confinados, 71,70 GWh/ano para dejetos de suínos e 32,15 GWh/ano para dejetos de aves (FEAM/MG, 2014).

Entretanto, no contexto local, os resultados obtidos mostram-se promissores. O Atlas da Bioenergia do Estado de Alagoas, desenvolvido pela Universidade Federal de Alagoas em parceria com o Conselho Estadual de Política Energética e a EMBRAPA apresenta o potencial de geração de energia das biomassas com maior relevância no Estado. Dentre eles, estão a cana-de-açúcar, mandioca, amendoim e coco. No entanto, para a produção de biogás a partir digestão anaeróbia, apenas efluentes líquidos agroindustriais foram considerados, sendo eles: efluentes de casa de farinha, matadouro, produção de vinhaça e laticínios. O melhor desempenho foi observado na digestão da vinhaça, onde o potencial foi de 206,26 GWh/ano. Os demais substratos apresentaram potencial inferior ao calculado nos três cenários no presente estudo, sendo de 6,24 GWh/ano para matadouro, 0,12 GWh/ano para manipueira e 0,0032 GWh/ano para laticínios.

A Figura 4.7 apresenta o potencial energético calculado por cenário e por microrregião alagoana. Arapiraca foi a microrregião com melhor rendimento, tendo apresentado 3.193,60 kW. Esse desempenho foi atribuído, sobretudo, ao Cenário 3, responsável por 67% do potencial

total, o que corresponde a 2.152,86 kW. Quanto à energia eletrificada, a co-digestão da silagem do capim-elefante e dejetos de avicultura na região teria potencial de produção de 17,91 GWh/ano.

Figura 4.7: Potencial energético (kW) das microrregiões alagoanas nos cenários 1, 2, e 3.



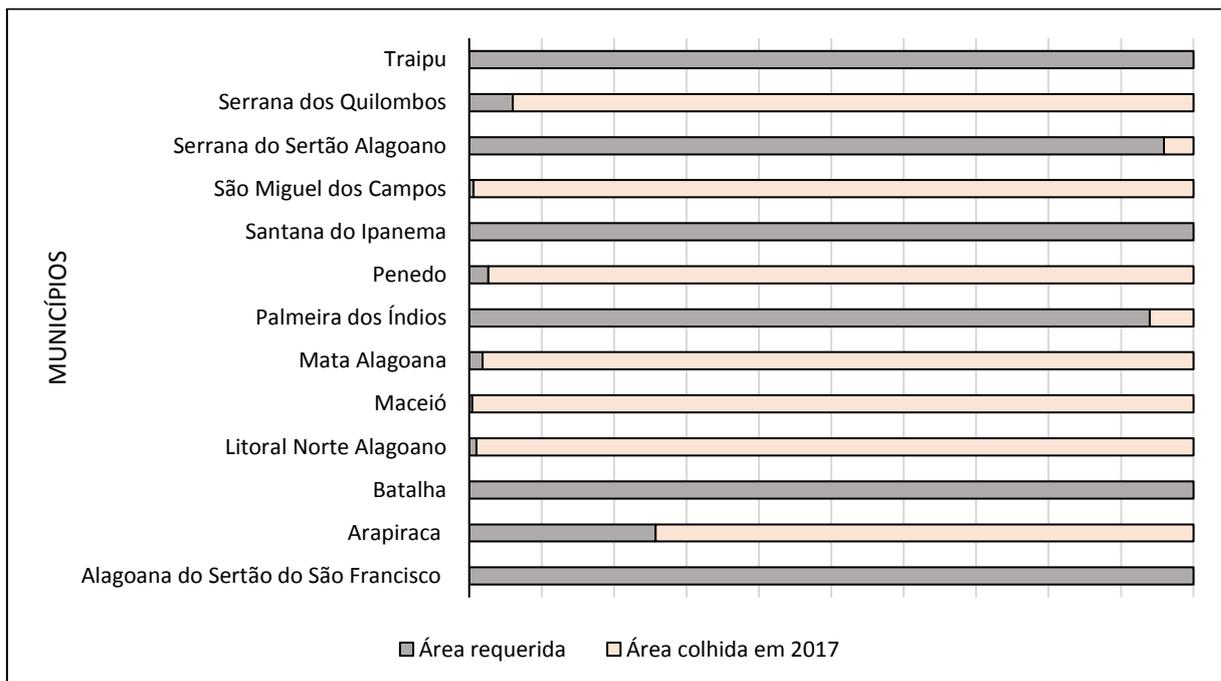
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2.1 Cenário 1: Dejetos da bovinocultura e silagem de capim-elefante

Considerando o efetivo de produção de bovinos leiteiros do Estado, e adotando uma relação C/N da mistura igual a 25, a co-digestão anaeróbia do capim-elefante e dejetos de bovinocultura em Alagoas teria potencial elétrico de 14.438,72 kW, com uma produção de biogás de 75.541.611,99 m³ ao ano. O maior desempenho seria encontrado na microrregião de Palmeira dos Índios, com potencial estimado em 2.842,83 kW. Destaca-se ainda Arapiraca e Batalha, que registrariam 2.047,85 kW e 2.082,96 kW.

Nas regiões em que foram registrados os melhores desempenhos, entretanto, de acordo com dados de colheita, observa-se pouco potencial de produção de capim-elefante. A Figura 4.8 traz à luz a área requerida para plantio do capim e a área colhida de cana-de-açúcar e, portanto, considerada disponível para cultivo de capim, nas microrregiões alagoanas no Cenário 1. É evidente a discrepância entre os valores requeridos e os dados reais.

Figura 4.8: Comparativo entre área colhida e área requerida para cultivo do capim-elefante no Cenário 1.

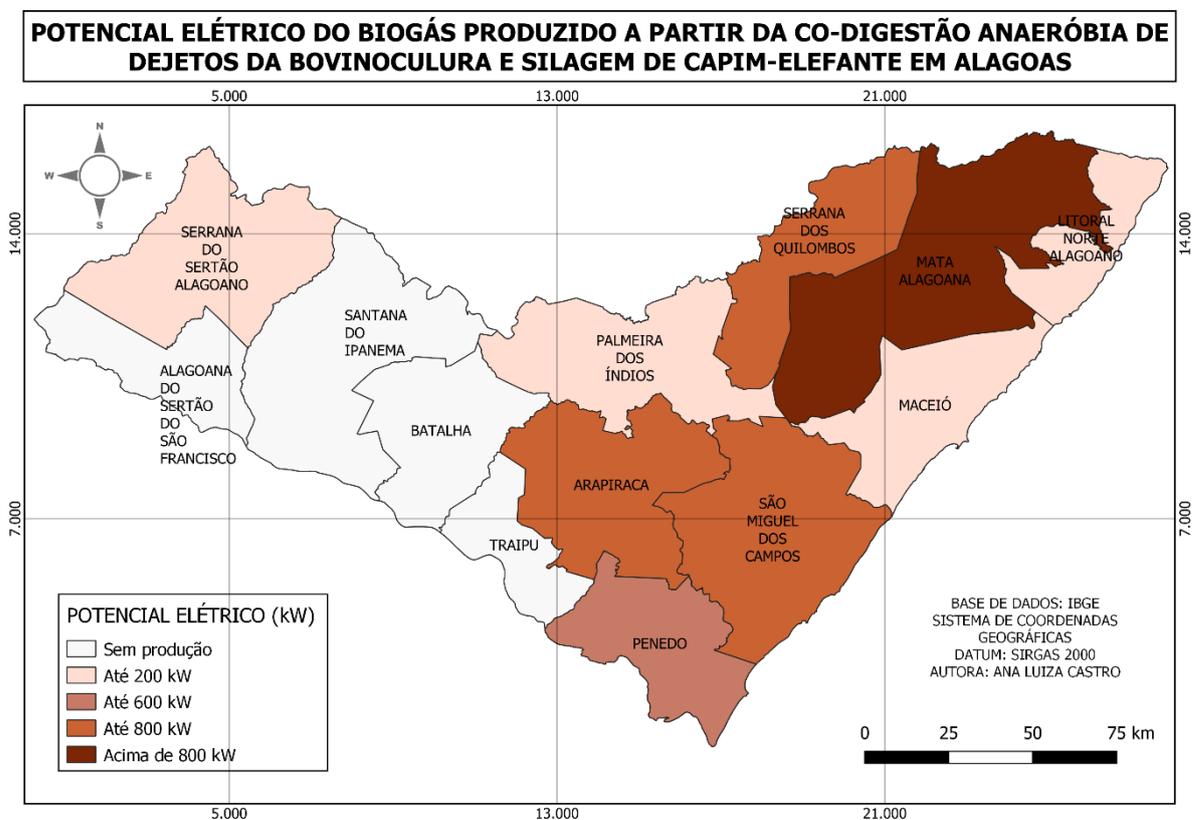


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Palmeira dos Índios, onde estimava-se obter o melhor resultado do Estado, teve potencial reduzido drasticamente: enquanto, em um primeiro momento, calcula-se potencial elétrico de 2.842,82 kW, ao considerar a área disponível para plantio do capim chegou-se ao valor 162,40 kW para o mesmo parâmetro. Resultado semelhante foi observado na microrregião de Batalha, que passou de um potencial elétrico de 2.082,96 kW para nenhuma geração.

A Figura 4.9 apresenta o potencial elétrico das microrregiões alagoanas no Cenário 1 considerando a capacidade de geração dos dois substratos. Sob essas circunstâncias, Alagoas teve uma redução de aproximadamente 70% do potencial energético anteriormente calculado, passando de 14.438,72 kW para 4.458,92 kW. A Mata Alagoana passou a ser a região com maior potencial, tendo registrado 1.275,51 kW. Cumpre destacar também Serrana dos Quilombos com 755,44 kW, Arapiraca com 693,20 kW e São Miguel dos Campos com 683,57 kW.

Figura 4.9: Potencial elétrico do biogás produzido no Cenário 1 por microrregião alagoana.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

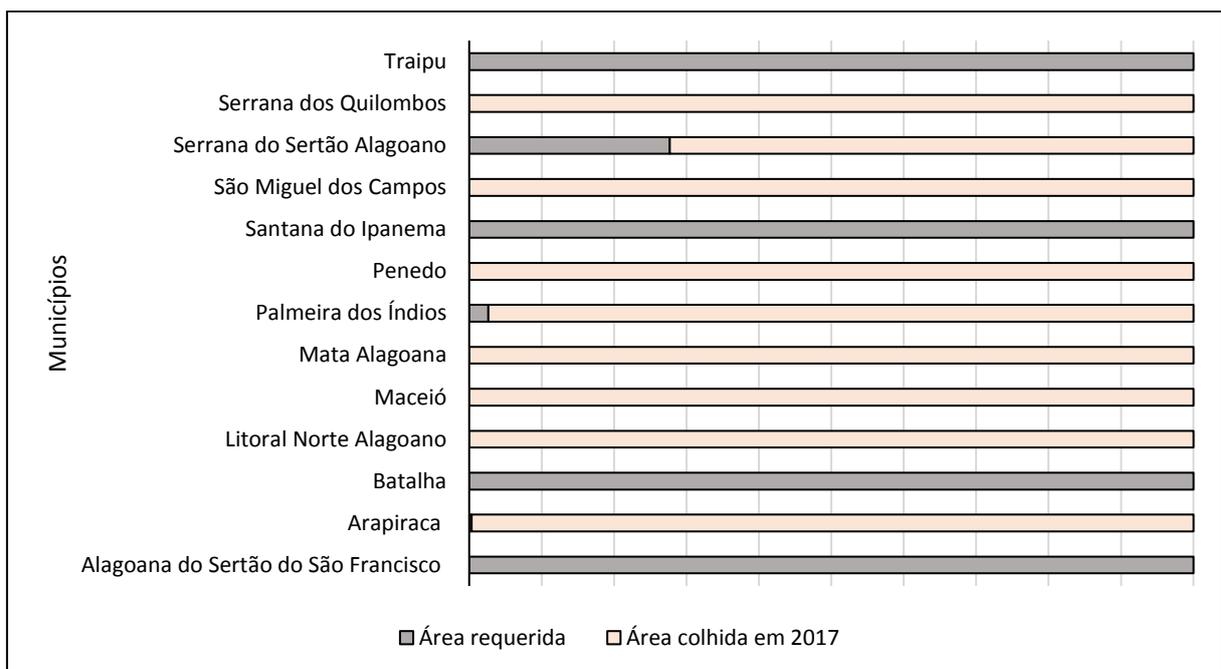
Segundo calculado, a co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos da bovinocultura teria uma energia eletrificada estimada de 37,10 GWh/ano. Conforme Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2020), o Estado de Alagoas consumiu, no ano de 2019, 1.159.393 GWh. Assim, esse cenário poderia suprir 0,0032% da energia demandada pelo Estado.

4.3.2.2 Cenário 2: Dejetos da suinocultura e silagem de capim-elefante

Os cálculos previamente realizados utilizando a área requerida de silagem de capim-elefante, mostraram que, nesse cenário, o Estado possuiria potencial elétrico de 3.518,00 kW, sendo pouco representativo quando comparado aos demais. Os maiores desempenhos seriam encontrados nas microrregiões de Arapiraca, Batalha e Palmeira dos Índios, sendo de, respectivamente, 784,77 kW; 569,86 kW e 401,75 kW.

Ao comparar as áreas requeridas na análise prévia e a disponível para cultivo por microrregiões observa-se que Serrana do Sertão Alagoano é a região com maior equilíbrio entre os dois quantitativos. Batalha, que no cálculo prévio seria a segunda região com melhor desempenho, não apresenta produção (Figura 4.10).

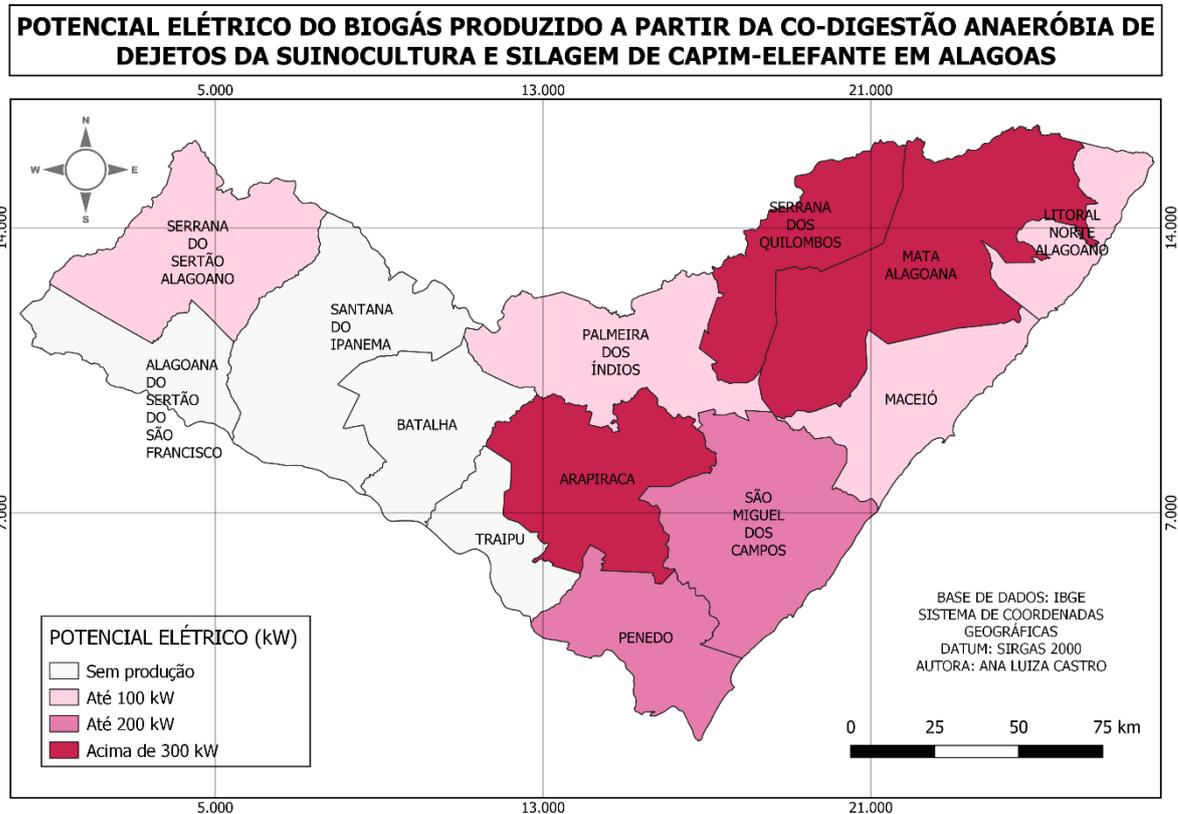
Figura 4.10: Comparativo entre área colhida e área requerida para cultivo do capim-elefante no Cenário 2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Sob esses aspectos, o Estado sofreu uma redução de, aproximadamente, 60% no potencial energético, obtendo uma capacidade estimada de 1.413,19 kW. O melhor desempenho foi registrado na microrregião de Serrana dos Quilombos, tendo um potencial de 371,86 kW. Destacaram-se ainda, Arapiraca e Mata Alagoana, com 347,52 kW e 301,93 kW (Figura 4.11).

Figura 4.11: Potencial elétrico (kW) do biogás produzido no Cenário 2 por microrregião alagoana.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

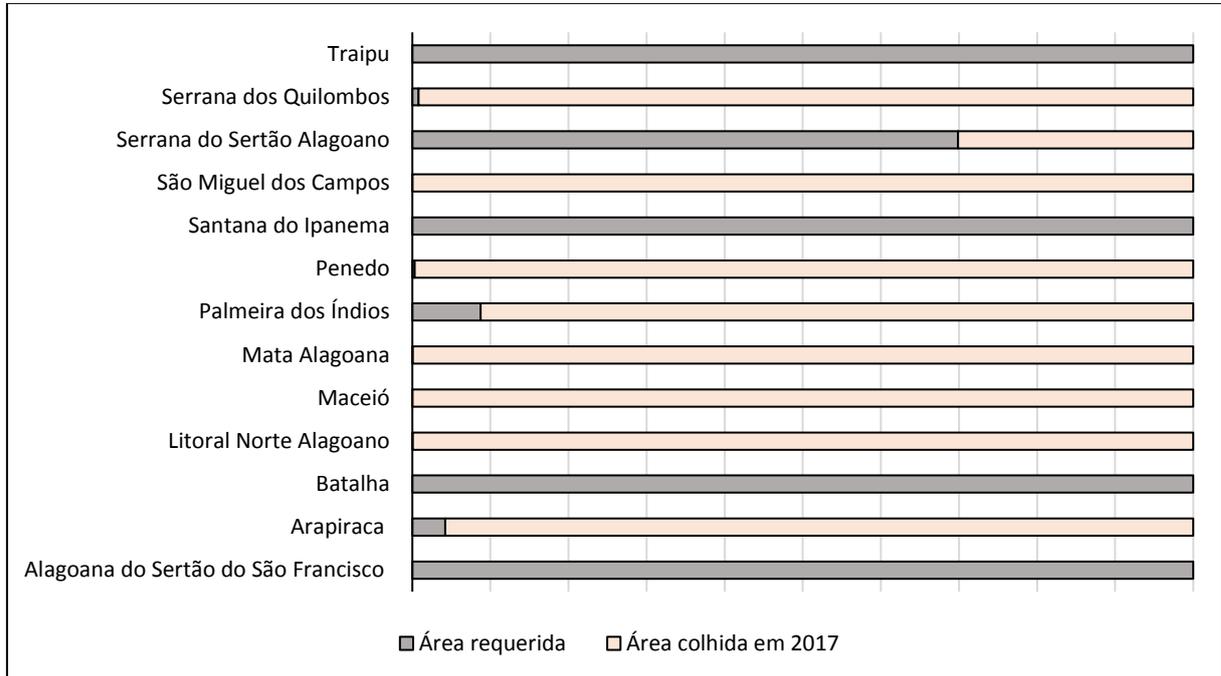
Quanto à energia eletrificada, estima-se que esse cenário tenha potencial de produzir 11,76 GWh/ano. Adotando um consumo energético do Estado de 1.159.393 GWh/ano, a co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos de suinocultura poderia suprir 0,001% da demanda energética do Estado.

4.3.2.3 Cenário 3: Dejetos da avicultura e silagem de capim-elefante

No terceiro cenário, onde foi avaliada a co-digestão de dejetos da avicultura e silagem de capim-elefante, ao avaliar somente os efetivos de rebanho, notou-se uma concentração do potencial de produção energética em apenas três microrregiões: Arapiraca (6.386,87 kW), Serrana dos Quilombos (5.390,65 kW) e Penedo (2.250,02 kW). Essas regiões representaram aproximadamente 75% do potencial energético do Estado no ano base, que foi de 18.676,43 kW.

Ao avaliar, além do quantitativo de animais, a capacidade de cultivo do capim em cada região, observou-se que Serrana do Sertão Alagoano é a região onde há o maior equilíbrio entre a área requerida e a colhida (Figura 4.12).

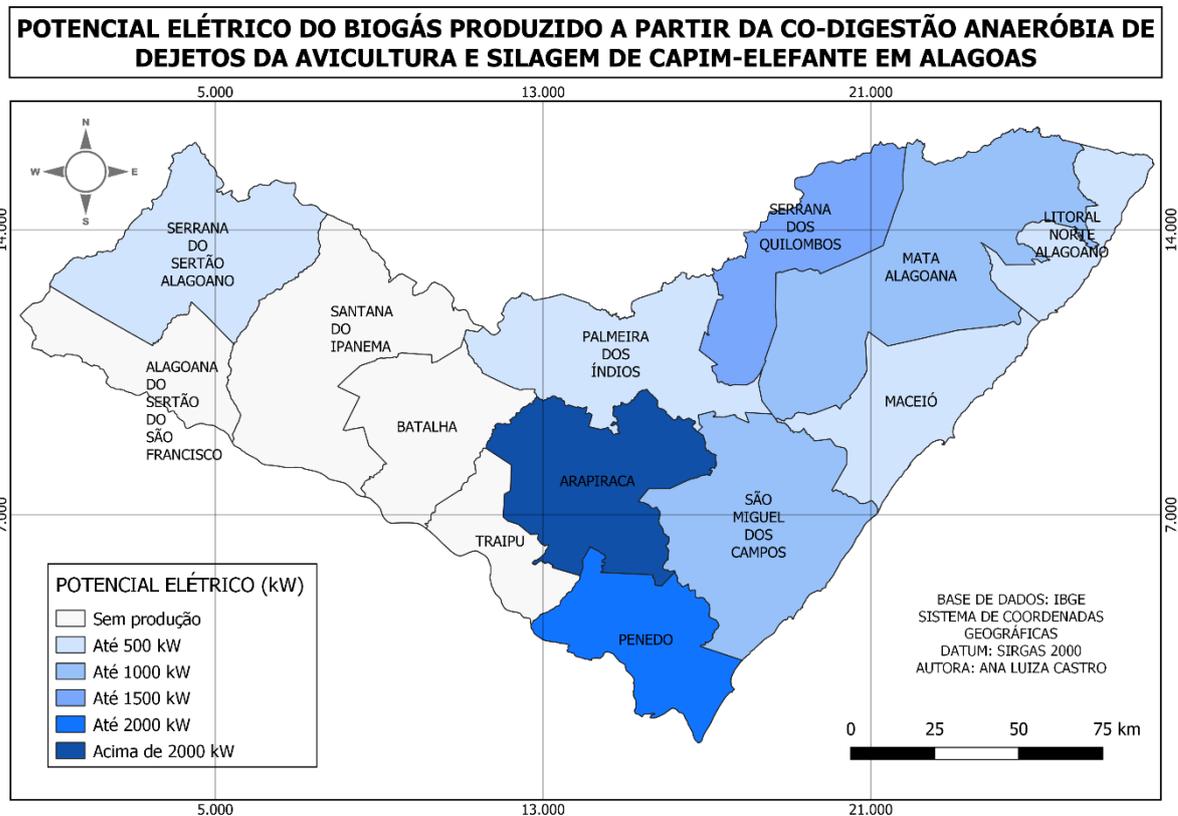
Figura 4.12: Comparativo entre área colhida e área requerida para cultivo do capim-elefante no Cenário 3.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nesse sentido, o Estado teve uma redução de pouco mais de 60%, apresentando um potencial elétrico total de 7.280,24 kW. Assim como observado no cálculo anterior, Arapiraca foi a região com melhor desempenho, tendo registrado 2.152,86 kW. Destacam-se, ainda, Penedo e Serrana dos Quilombos, com 1.751,49 kW e 1.374,33 kW, conforme exposto na Figura 4.13.

Figura 4.13: Potencial elétrico do biogás produzido no Cenário 3 por microrregião alagoana.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No tocante à energia eletrificada, o Cenário 3 apresentou potencial estimado de 60,59 GWh/ano. Sabendo que Alagoas obteve um consumo de energia de 1.159.393 GWh, a co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos da avicultura poderia suprir, aproximadamente, 0,005 % da demanda energética do Estado.

4.3.3 Avaliação do potencial energético dos municípios alagoanos a partir da co digestão anaeróbia de silagem de capim-elefante e dejetos de três diferentes criações de animais.

Nesse tópico, serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise da estimativa de produção energética dos municípios componentes de cada microrregião alagoana. Os produtos serão expostos em gráficos contendo o potencial energético de cada município nos três cenários de co-digestão avaliados.

Por oportuno, cumpre destacar que os resultados aqui apresentados consideraram, assim como no tópico anterior, os efetivos de rebanho dos animais e o potencial de cultivo de

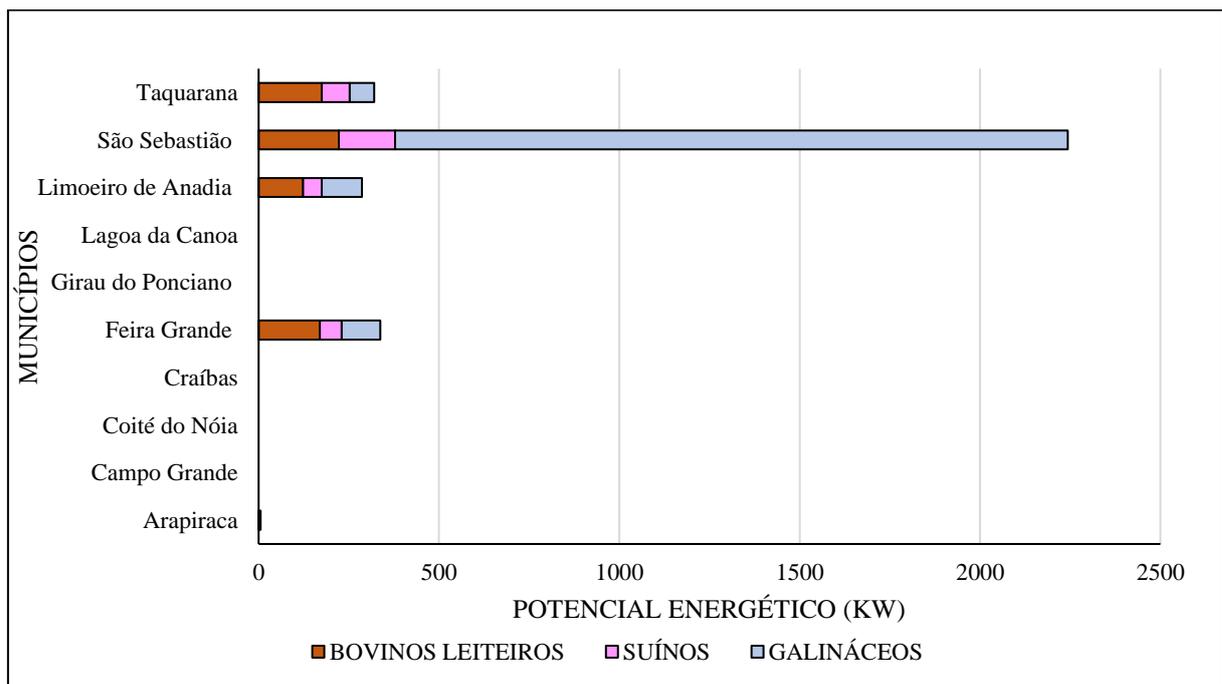
capim-elefante dos municípios. Assim, as microrregiões Alagoana do Sertão de São Francisco, Batalha, Santana do Ipanema e Traipu, por não ter sido observada área disponível para plantio da gramínea, não serão discutidas.

4.3.3.1 Arapiraca

Essa região mostrou, considerando os três cenários analisados, o maior potencial elétrico, tendo uma geração estimada em 3.193,59 kW. Esse desempenho se deve sobretudo ao município de São Sebastião, o qual totalizou uma capacidade de produção de 2.243,38 kW.

Além de São Sebastião, a microrregião de Arapiraca é composta por mais nove municípios. Desses, cinco não apresentaram qualquer produção. Taquarana, Limoeiro de Anadia e Feira Grande tiveram desempenho semelhante, sendo estimado um potencial elétrico em torno de 300 kW (Figura 4.14).

Figura 4.14: Potencial elétrico (kW) na microrregião Arapiraca.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No tocante aos substratos, a avicultura exerceu uma predominância no potencial da região, sendo responsável por aproximadamente 70% do montante energético. Nesse cenário, a microrregião teria potencial de produção de 17,91 GWh/ano, podendo suprir 0,00154 % da energia consumida em Alagoas. Os cenários 1 e 3 apresentaram potencial elétrico estimado de 693,20 kW e 347,52 kW, com energia eletrificada de 5,77 GWh/ano e 2,89 GWh/ano, respectivamente,

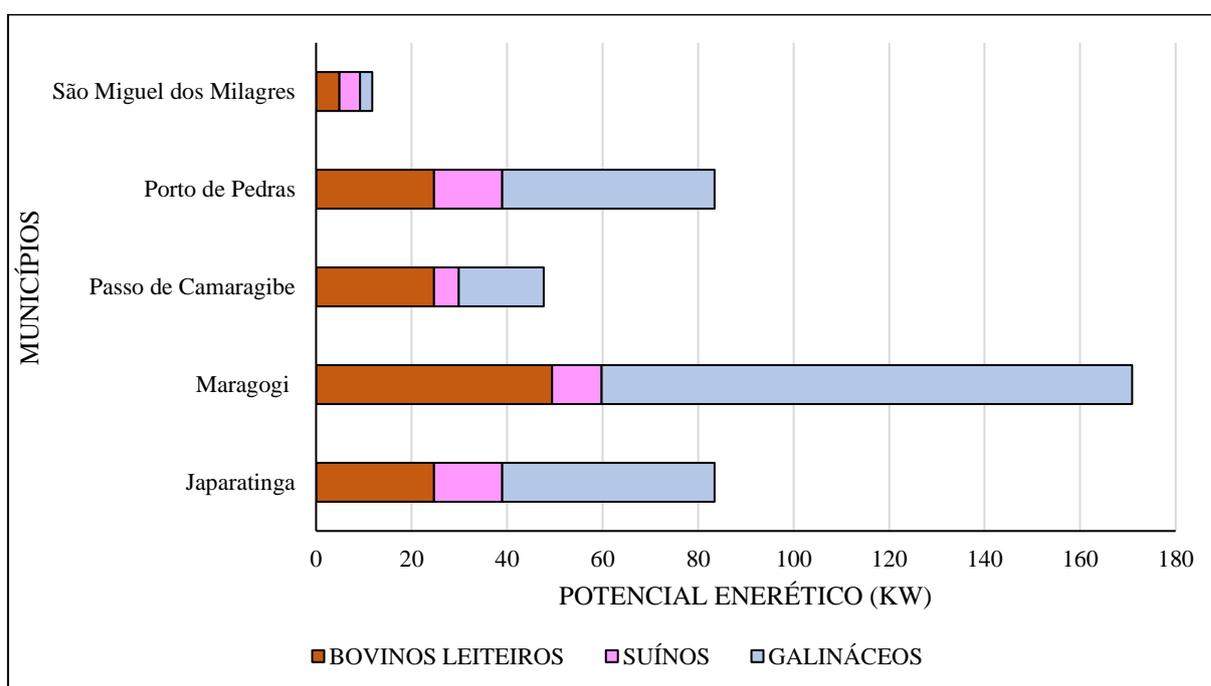
Na co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos da avicultura, o município de São Sebastião apresentou energia eletrificada estimada em 15,77 GWh/ano. Assim, nesse cenário, o município poderia, sozinho, suprir a demanda energética de 6.421 habitantes.

4.3.3.2 Litoral Norte Alagoano

O Litoral Norte Alagoano está entre as seis microrregiões componentes da mesorregião Leste de Alagoas. Seis municípios integram a região, sendo Maragogi a cidade com maior potencial elétrico nos cenários estudados (170,90 kW).

A produção da região, no entanto, mostra-se pouco representativa, sendo de 397,14 kW, o que corresponde a um pouco mais de 3% do potencial do Estado. O melhor desempenho foi obtido no Cenário 3, com potencial de 220,32 kW. A co-digestão da silagem do capim-elefante e dejetos de bovinocultura teve uma estimativa de 128,42 kW, enquanto quando foram avaliados os dejetos da suinocultura, o potencial foi de 48,40 kW (Figura 4.1).

Figura 4.15: Potencial elétrico na microrregião Litoral Norte Alagoano.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

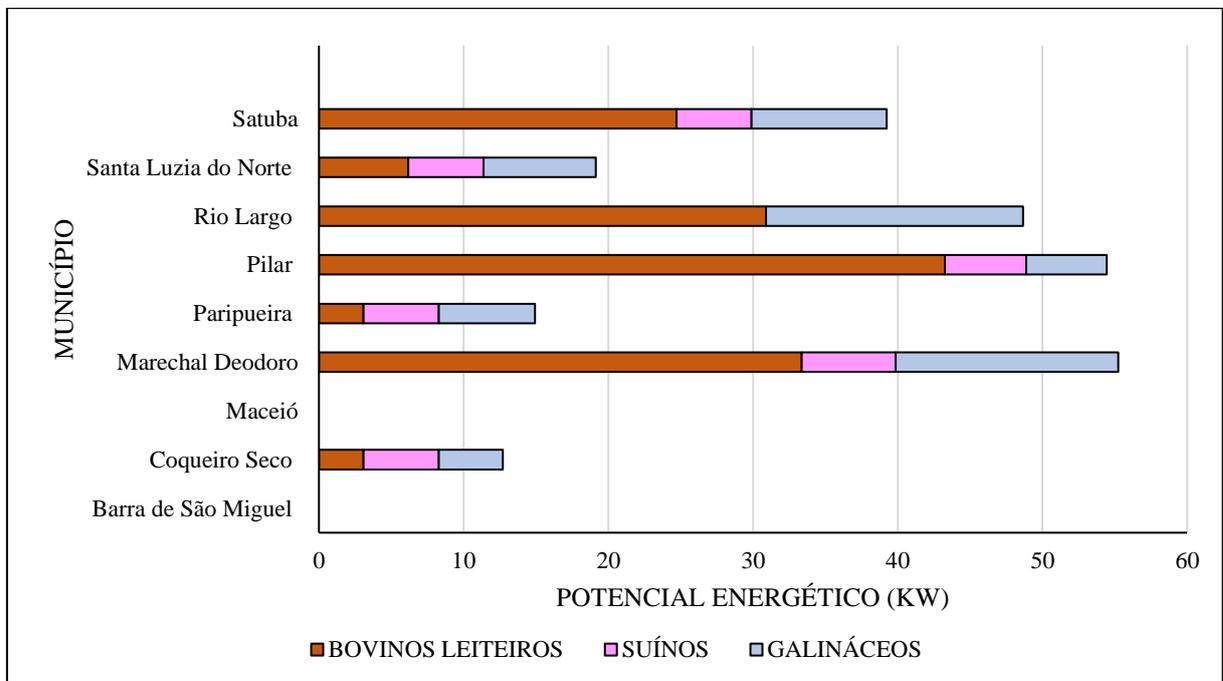
Quanto à energia eletrificada, o Cenário 3 apresentou potencial de geração de 1,83 GWh/ano, enquanto os cenários 1 e 3 produziram 1,08 GWh/ano e 0,40 GWh/ano.

4.3.3.3 Maceió

Além da capital alagoana, a microrregião Maceió abrange outros nove municípios, conforme exposto na Figura 4.16. Assim como o Litoral Norte Alagoano, Maceió não apresentou números significativos no tocante à estimativa de produção energética nos três cenários.

Os maiores potenciais foram observados nas cidades de Marechal Deodoro, Pilar e Rio Largo que registraram, respectivamente, 55,24 kW, 54,43 kW e 48,67 kW. Pode-se destacar ainda o município de Satuba, com 39,23 kW.

Figura 4.16: Potencial elétrico(kW) na microrregião Maceió.



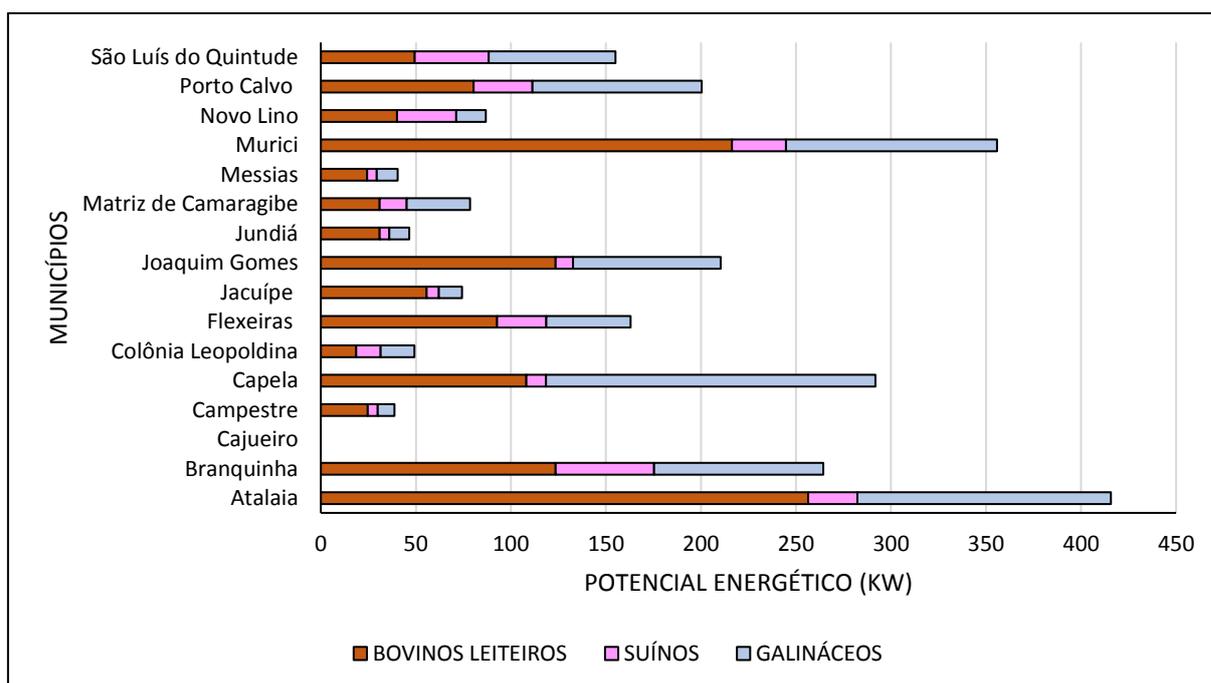
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No que concerne aos substratos, o maior rendimento foi o de bovino leiteiro, totalizando 150,75 kW e 1,54 GWh/ano, ao passo que galináceos e suínos apresentaram, 73,39 kW e 0,61 GWh/ano, e 38,04 kW e 0,31 GWh/ano, respectivamente.

4.3.3.4 Mata Alagoana

Com produção estimada de 2.470,98 kW, a microrregião da Mata Alagoana foi a segunda região com o melhor rendimento nos cenários analisados. Localizada na mesorregião Leste Alagoano, é a microrregião com o maior número de municípios integrantes, sendo composta por 16 cidades. Destacaram-se as cidades de Atalaia e Murici, tendo uma produção estimada de 415,64 kW e 355,85 kW, respectivamente.

Figura 4.17:Potencial elétrico(kW) na microrregião Mata Alagoana.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No que cerne aos cenários avaliados, o maior rendimento observado na digestão com dejetos da bovinocultura (1.275,50 kW), seguido da avicultura (893,54 kW) e suinocultura (301,93 kW).

Os rendimentos obtidos têm um potencial de produção de energia eletrificada de 10,61 GWh/ano (Cenário 1), 7,43 GWh/ano (Cenário 3) e 2,51 GWh/ano (Cenário 2), considerando um sistema com operação em 95% das horas do ano.

4.3.3.5 Palmeira dos Índios

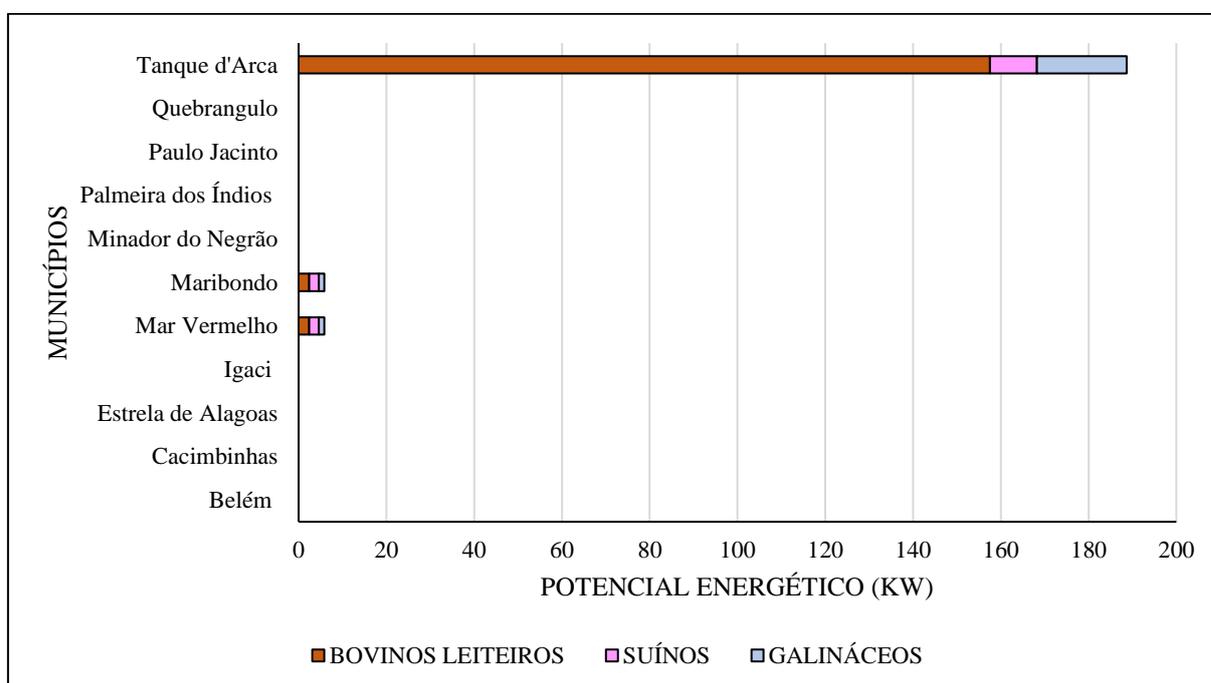
No total, 11 municípios integram a microrregião região, entretanto, devido à ausência de áreas disponíveis para o plantio de capim-elefante, apenas três deles apresentaram potencial elétrico nos cenários avaliados. No estudo, destacou-se o município de Tanque

d'Arca que, com potencial elétrico de 188,69 kW, foi responsável por mais de 94% da estimativa energética da microrregião considerando os três cenários.

A microrregião apresentou um rendimento total de 189,73 kW, sendo 162,40 kW oriundos do cenário onde houve co-digestão com dejetos da bovinocultura, 23,01 kW do Cenário 3 e 4,32 kW do Cenário 2 (Figura 4.18).

Nesse sentido, a microrregião teria um potencial de produção de energia eletrificada de 1,35 GWh/ano no Cenário 1, 0,19 GWh/ano no Cenário 3 e 0,036 GWh/ano no Cenário 2.

Figura 4.18: Potencial elétrico na microrregião Palmeira dos Índios.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

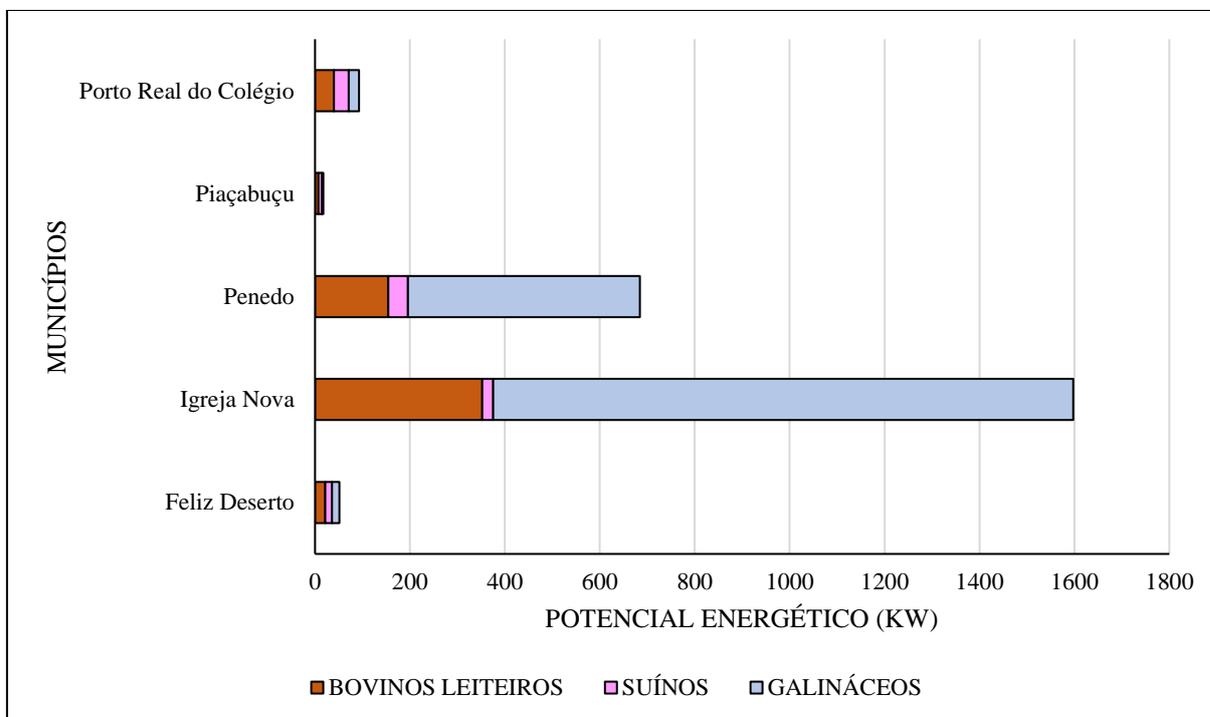
4.3.3.6 Penedo

Apenas cinco municípios integram a microrregião de Penedo, localizada no Leste Alagoano. Ainda assim, a região teve uma produção estimada de 2.443,44 kW, ocupando a quarta posição no *ranking* de melhores rendimentos nos cenários estudados (Figura 4.19).

Esse resultado foi devido, especialmente, ao potencial de geração de biogás de dejetos oriundos da avicultura e silagem de capim-elefante, que, com potencial de 1.751,49 kW, representou aproximadamente 72% da energia estimada na região.

Dentre os municípios, o grande destaque foi Igreja Nova, com potencial elétrico de 1.597,55 kW.

Figura 4.19: Potencial elétrico(kW) na microrregião Penedo.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No tocante ao potencial de geração de energia eletrificada, estima-se que o Cenário 3 possa produzir cerca de 14,60 GWh/ano, podendo atender aproximadamente 0,00126 da energia demandada no Estado. Os cenários 1 e 2 apresentaram rendimento de 4,79 GWh/ano e 0,97 GWh/ano, respectivamente.

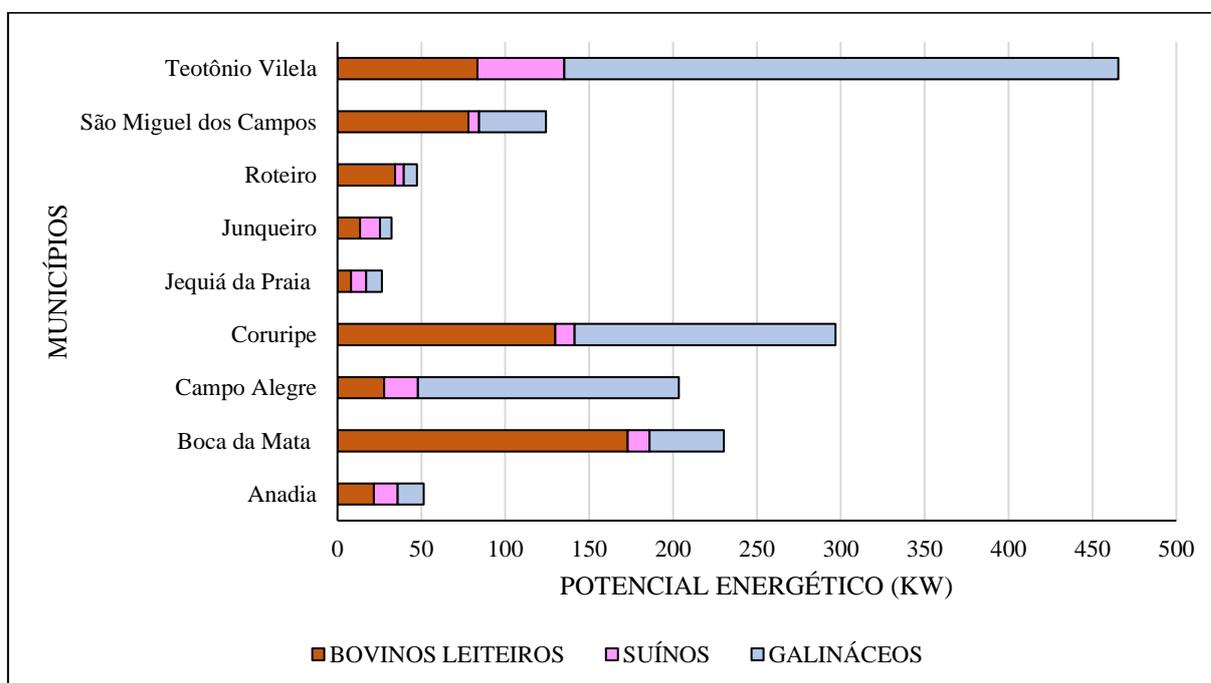
4.3.3.7 São Miguel dos Campos

Nove municípios integram a microrregião de São Miguel dos Campos. Tal qual observado em outras microrregiões do Leste Alagoano, a região apresentou maior rendimento no cenário onde foi utilizado dejetos da avicultura (Figura 4.20).

Nessa situação, estimou-se uma produção de 773,30 kW, sendo gerada 6,43 GWh/ano de energia eletrificada. A co-digestão com dejetos da bovinocultura também se mostrou representativa, tendo um potencial de 683,58 kW e 6,69 GWh/ano.

Quanto aos municípios, destaca-se Teotônio Vilela, com potencial elétrico de 465,44 kW, seguido de Coruripe (296,94 kW), Boca da Mata (230,39 kW) e Campo Alegre (203,56 kW).

Figura 4.20: Potencial elétrico (kW) na microrregião São Miguel dos Campos.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

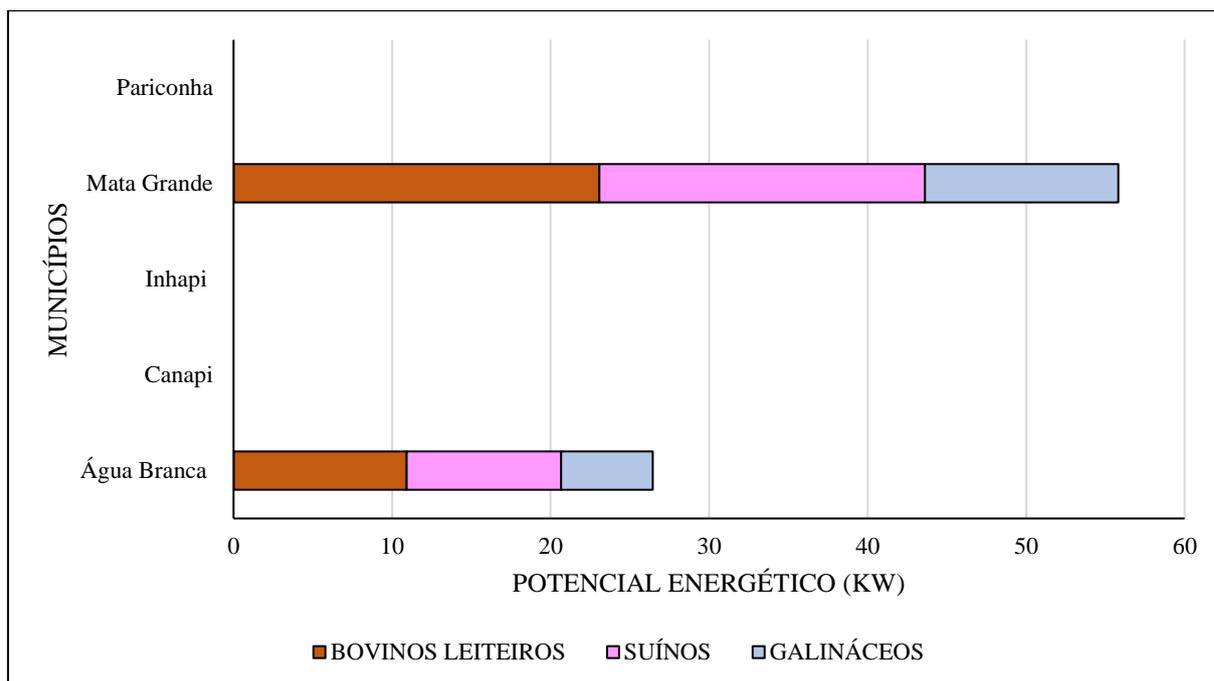
4.3.3.8 Serrana do Sertão Alagoano

Localizada na mesorregião do Sertão Alagoano, a microrregião Serrana do Sertão Alagoano é composta por cinco municípios, sendo eles Água Branca, Canapi, Inhapi, Mata Grande e Pariconha. Desses, apenas Mata Grande e Água Branca apresentaram produção, sendo de 55,81 kW e 26,44 kW.

Apesar de pertencerem à mesorregião do Sertão Alagoana, os municípios de Mata Grande e Água Branca apresentam-se como exceções mais úmidas devido à influência orográfica, onde as altitudes são elevadas. Nessas regiões, a precipitação pluviométrica pode alcançar valores superiores a 1.000 mm, com temperatura média de 21 a 20 °C (BARROS et al., 2012), o que justifica a capacidade de cultivo dos municípios e, consequentemente, os resultados obtidos nesse estudo.

No tocante aos substratos, destacaram-se os Cenários 1 e 3, com potencial elétrico de 34,00 kW (0,29 GWh/ano) e 30,24 kW (0,25 GWh/ano). A co-digestão de dejetos da suinocultura e silagem de capim-elefante registrou 17,99 kW (0,15 GWh/ano) (Figura 4.21).

Figura 4.21: Potencial elétrico (kW) na microrregião Serrana do Sertão Alagoano.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

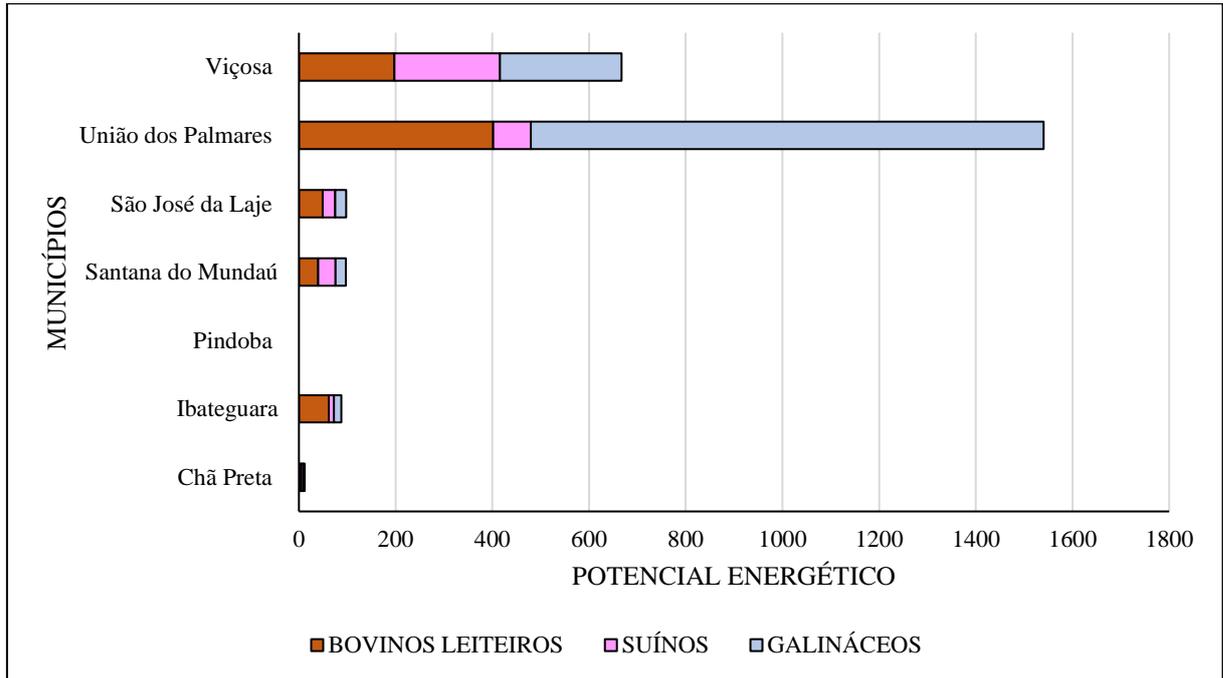
4.3.3.9 Serrana dos Quilombos

A microrregião Serrana dos Quilombos, localizada no Leste Alagoano, é composta por oito municípios. Conforme estudo, foi a segunda região com maior potencial de produção, sendo estimado um potencial elétrico de 2.501,64 kW.

Esse resultado deve-se, sobretudo, aos municípios de União dos Palmares e Viçosa (Figura 4.22). De acordo com os cálculos realizados, União dos Palmares registrou um potencial de 1.540,27 kW, enquanto Viçosa obteve 667,39 kW.

O cenário onde a silagem do capim foi digerida com os dejetos da avicultura apresentou os melhores resultados, tendo potencial estimado em 1.374,33 kW (11,43 GWh/ano). Um bom desempenho também foi observado no Cenário 1, onde a estimativa foi de 755,44 kW (6,28 GWh/ano). Os dejetos de suinocultura digeridos com silagem do capim renderam um potencial de 371,86 kW (3,09 GWh/ano).

Figura 4.22: Potencial elétrico (kW) na microrregião Serrana dos Quilombos.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.4 Conclusão

O presente trabalho buscou avaliar o potencial energético teórico da co-digestão de silagem de capim-elefante e de diferentes criações de animais de Alagoas a partir da avaliação da disponibilidade dos substratos em cada microrregião do Estado.

Ao considerar além do efetivo de rebanho, as áreas passíveis de plantio de capim-elefante, o Estado sofreu uma redução de aproximadamente 64 % do potencial energético em comparação à etapa onde foram avaliadas a disponibilidade tão somente dos quantitativos de animais. A perda foi mais acentuada no Cenário 1, onde foi avaliado o uso de dejetos de bovinocultura leiteira. Esse fato pode ser justificado pela concentração da criação de gado leiteiro no sertão alagoano, região em que as características agrônômicas não favorecem o cultivo do capim-elefante. Esse resultado evidencia a importância de ser considerada a disponibilidade de todos os substratos que serão utilizados na co-digestão ao realizar o levantamento do potencial teórico de produção de biogás em uma área.

No que tange aos cenários avaliados, o maior potencial de produção de energia do Estado de Alagoas está associado ao uso dos dejetos oriundos da avicultura. Além do maior quantitativo de rebanho de galináceos, nesse cenário foi observado um maior equilíbrio entre as áreas disponíveis para plantio da gramínea e o quantitativo de animais nas microrregiões.

De forma geral, Arapiraca apresentou desempenho superior aos das demais microrregiões alagoanas. No melhor dos cenários, a saber, a co-digestão de dejetos de avicultura e silagem do capim-elefante, a microrregião apresentou potencial teórico de produção de energia de 17,91 GWh/ano. Considerando a energia consumida em Alagoas no ano de 2019, a produção calculada seria suficiente para suprir 0,00154 % da demanda energética do Estado.

Dentre os municípios, destacou-se São Sebastião. Localizado na microrregião de Arapiraca, seu rendimento foi responsável por mais de 70 % do potencial energético observado na região. Esse desempenho se deu, sobretudo, pela co-digestão da silagem de capim-elefante e dejetos da avicultura.

O Estado de Alagoas possui uma capacidade instalada aproximada de 4000 MW. No melhor dos cenários avaliados, isto é, na co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos da avicultura a produção energética corresponderia a 0,18 % da energia produzida no Estado.

Contudo, a produção energética nos cenários avaliados contribui para a descentralização da energia, podendo reduzir investimentos em linhas de transmissão e perdas devido ao transporte de energia, e atender populações desatendidas. Assim, embora tenha potencial pouco representativo considerando a capacidade instalada de Alagoas, a aplicação da tecnologia estudada mostra-se relevante, ainda mais se for ponderada a diversificação da matriz energética e descentralização de energia; e o tratamento de efluentes.

Por fim, cumpre ressaltar que a avaliação do potencial teórico aqui realizada serve apenas como uma análise prévia, tendo em vista que esse potencial não considera restrições para conversão e uso da energia disponível. Entretanto, o estudo mostrou a região e tipo de criação com maior potencial energético tomando como base a disponibilidade de matéria-prima. Isto posto, sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam avaliados os potenciais técnico e econômico da cultura e microrregião com melhor desempenho, a saber, a co-digestão de capim-elefante e dejetos da avicultura na microrregião de Arapiraca.

Capítulo 5 : Considerações finais

O desenvolvimento deste trabalho evidenciou a importância do levantamento bibliométrico para o avanço de pesquisas acerca de uma temática. No terceiro capítulo, após análise de documentos publicados acerca da digestão anaeróbia e produção de biogás a partir do capim-elefante, restou entendido que os estudos sobre o tema averiguado ainda estão nos passos iniciais.

O primeiro artigo foi publicado em meados de 1980. No entanto, até o início da segunda década do século XXI, as publicações eram realizadas de forma temporalmente espaçadas. Apenas a partir de 2010 o tema começou a ganhar popularidade, iniciando um crescimento exponencial.

Embora os termos de pesquisa tenham sido escolhidos com o fito de apresentar apenas trabalhos associados à temática estudada, a maioria dos artigos retornados tinham como objetivo realizar adequações no capim-elefante com vistas à alimentação de ruminantes. Ainda assim, avaliando as publicações de artigos de pesquisa, foi possível perceber que o continente asiático é o grande fomentador científico das discussões. Esse título se deu em razão do desempenho da Tailândia e China que ocupam o primeiro e quarto lugar no *ranking* dos países como maior número de publicações.

No que tange à análise das tendências de pesquisa por período avaliado, notou-se uma heterogeneidade dos objetivos, de modo que trabalhos publicados na mesma época apresentaram perspectivas distintas. Em síntese, a maioria dos estudos abordaram a melhor idade de colheita da gramínea para uso na digestão anaeróbia, métodos de tratamento da biomassa lignocelulósica para superar a hidrólise lenta e os efeitos da aplicação da cultura energética na digestão de resíduos de origem animal.

Com trabalhos publicados em dois dos quatro períodos avaliados, a análise da idade de colheita do capim-elefante mostrou conclusão unânime: tecidos mais jovens tendem a ter um melhor rendimento de produção de CH₄ do que tecidos mais velhos. Esse resultado está relacionado ao teor de lignina que, em plantas jovens, é menor. Quanto à idade ideal, estima-se que a idade de corte ótima para a geração de biogás esteja entre 45 e 60 dias.

No que tange ao tratamento prévio da gramínea, os estudos apresentaram grande diversidade. A maior parte das pesquisas aplicaram pré-tratamentos biológicos com o uso de culturas de microrganismos, químicos com aplicação de substâncias alcalinas e físicos

observando os efeitos da temperatura na biomassa. De modo geral, o tratamento alcalino apresentou resultados mais promissores, mostrando-se eficiente no aumento da biodigestibilidade do capim-elefante.

Quanto à adição do capim na digestão anaeróbia de resíduos animais, as pesquisas mostraram que a aplicação da cultura energética potencializa o rendimento de produção de biogás e gás metano devido ao alcance de uma relação C/N dentro dos limites ideais.

No capítulo 4, foi observada a relevância de se considerar a disponibilidade de todos os substratos em estudos de potencial teórico de produção energética onde é avaliada a quantidade de energia contida em uma área. No estudo realizado, o potencial energético da co-digestão de silagem de capim-elefante e dejetos de diferentes criações calculado utilizando dados do Estado de Alagoas sofreu redução de 64% quando avaliados, além dos efetivos de rebanho, a área disponível para plantio da gramínea.

A criação animal com maior potencial energético no Estado é a avicultura e, dentre as microrregiões, Arapiraca apresentou desempenho superior. Destaca-se aqui o município de São Sebastião. Isto posto, a região poderia ser considerada com uma área viável para construção de um polo de produção de energia, conduzindo, assim, o Estado para uma diversificação da matriz energética.

Capítulo 6 : Perspectivas para trabalhos futuros

- Avaliar a produção científica na temática de digestão anaeróbia do capim-elefante para produção de biogás em diferentes bases de dados com vistas a obter um efetivo diagnóstico das tendências do tema.

- Avaliar os potenciais técnico e econômico da produção de energia a partir da co-digestão anaeróbia de silagem de capim-elefante e dejetos de avicultura na microrregião de Arapiraca, especialmente no município de São Sebastião.

REFERÊNCIAS

- ALAGOAS (Estado). Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Turismo. **Balço Energético de Alagoas 12ª edição**. 2020. 77 p. Disponível em: <<http://www.sedetur.al.gov.br/balanco-energetico/send/63-balanco-energetico/245-beal-2020>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- ALAGOAS (Estado). Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Turismo. **Atlas de bioenergia de Alagoas**. 2015. 81 p. Disponível em: <<https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/afeb8864-d85e-4d35-8a0e-3ad6976aa13d/resource/72e30f96-52f1-4342-80da-6b93b21bda64/download/atlasbioenergia20152.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- ALVES, F. G. S. et al. Capim-elefante: Um recurso bioenergético. **Nucleus Animalium**, v. 10, n. 2, p. 117-130, 2018.
- ANDREO-MARTÍNEZ, P. et al. A descriptive bibliometric study on bioavailability of pesticides in vegetables, food or wine research (1976–2018). **Environmental toxicology and pharmacology**, v. 77, p. 103374, 2020.
- AWAIS, M. et al. Methane production and kinetic modeling for co-digestion of manure with lignocellulosic residues. **Energy & Fuels**, v. 30, n. 12, p. 10516-10523, 2016.
- BANCO DO NORDESTE. **Perfil socioeconômico de Alagoas**. Fortaleza, 2015. Disponível em: <https://200.164.107.200/s482-dspace/bitstream/123456789/766/1/2015_SPS_AL.pdf>. Acesso em 20 set. 2021.
- BARROS, A. H. C. et al. Climatologia do estado de Alagoas. **Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2012.
- BATISTA, E. A. Produção de hidrogênio e metano a partir de efluentes de suinocultura e manipueira em reatores anaeróbios. 2014. 82f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/5107/1/Produ%20de%20hidrog%20a%20partir%20de%20efluentes%20de%20suinocultura%20e%20manipueira%20em%20reatores%20anaer%20b3bios.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2021.

BEGUM, S. et al. Operational strategy of high rate anaerobic digester with mixed organic wastes: effect of co-digestion on biogas yield at full scale. **Environmental technology**, v. 41, n. 9, p. 1151-1159, 2020.

BOONPIYO, S.; SITTIJUNDA, S.; REUNGSANG, A.. Co-digestion of napier grass with food waste and napier silage with food waste for methane production. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3200, 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica ano base 2019**. 2020. 256p. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf> >. Acesso em: 30 out. 2021.

CAÑAS-GUERRERO, I. et al. Bibliometric analysis of research activity in the “Agronomy” category from the Web of Science, 1997–2011. **European Journal of Agronomy**, v. 50, p. 19-28, 2013.

CARVALHO, A. R. et al. Water-energy nexus: Anaerobic co-digestion with elephant grass hydrolyzate. **Journal of environmental management**, v. 181, p. 48-53, 2016.

CARVALHO, G. B. **Caracterização da produção de biomassa de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Shum.), cv. Cameroon, em função da adubação nitrogenada e irrigação em região semiárida**. 2014.180p.Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo. Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-15092014-105600/en.php> >. Acesso em 01 out 2021.

CHANDRA, R.; TAKEUCHI, H.; HASEGAWA, T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1462-1476, 2012.

CHANPLA, M. et al. Effect of harvesting age and performance evaluation on biogasification from Napier grass in separated stages process. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 1, p. 40-45, 2018.

CERNICHARO, C.A.L. **Reatores Anaeróbios**. 2 ed. amp. e atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Nota técnica: N° 002/2010 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, abr. 2020. Disponível em: <<https://>

biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-nobrasil-em-2019.pdf>. Acesso em 10 nov 2021.

COELHO, S. T., VELÁZQUEZ, S. M. S. G., PECORA, V., ABREU, F. C. Geração de Energia Elétrica A Partir Do Biogás Proveniente Do Tratamento De Esgoto.: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA (CBE)**, 11., 2006, Rio de Janeiro: Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia, 2006. p. 547-562.

DA SILVA, V. B. et al. Assessment of energy production in full-sibling families of elephant grass by mixed models. **Renewable energy**, v. 146, p. 744-749, 2020.

DE SOUZA, S. N. M.; ASSOCIADO, C. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. 2016. 48 p. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em:

<https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60627641/Manual_Geracao_Energia_Eletrica_Biogas_20190917-6778-nxk7iq-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1637872575&Signature=BEhpcFzxGOG9eevyhu8V7saMC43AuyKDrKIEfp_h0kpXwWaiT~9fhw65EORuQ3eOi6qIAB5v3bAVJ8LEJRwZ8~1SONNZHYioug7MHFI3LUs8uUvzagR4Q8TfSzMluQ7QbcPgy6gzz7yE8LlI3KMT8DWCDL0e00nhUVd20cF1jN1wn1hsCHvGbsncAIIWEP-1kLKI-DRyZ6tKmN7vUHFefT13Cbtbdr041KtTR2FXj7RKIZWHCdaP~Vz3DPpASEO6LQfEUCU BUzcAvZtvjtvSQTHMaOC9XuqVER~U2tp2R8H1Mpcy0BakKI3Ajz3ibYr3HUutJTIIgb-KNXaNG-e1BGA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Acesso em 10 out 2021.

DI CIACCIO, F.; TROISI, S. Monitoring marine environments with Autonomous Underwater Vehicles: a bibliometric analysis. **Results in Engineering**, p. 100205, 2021.

DUSSADEE, N.; RAMARAJ, R.; CHEUNBARN, T.. Biotechnological application of sustainable biogas production through dry anaerobic digestion of Napier grass. **3 Biotech**, v. 7, n. 1, p. 47, 2017.

DUSSADEE, N.; REANSUWAN, K.; RAMARAJ, R.. Potential development of compressed bio-methane gas production from pig farms and elephant grass silage for transportation in Thailand. **Bioresource technology**, v. 155, p. 438-441, 2014.

EKPENYONG, K. I. et al. Biogas production potential of unextracted, nutrient-rich elephant-grass lignocellulose. **Fuel**, v. 74, n. 7, p. 1080-1082, 1995.

EKWENCHI, M. M. et al. Gaseous fuel production from fungal lignocellulose degradation. **Fuel**, v. 69, n. 12, p. 1569-1572, 1990.

ESTEVEZ, E. M. M. et al. Life cycle assessment of manure biogas production: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 411-423, 2019.

FEAM/MG. **Potencial de energias renováveis - Volume II – Biomassa , resíduos e hidroeletricidade.** , v. II, p. 120, 2014

FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.

FREITAS, M. A.V.; SOITO, J. L. S.. Energia e recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 177-216, 2010

GALBIATTI, J. A. et al. Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 432-437, 2010.

GARFIELD, E. Journal impact factor: a brief review. **Cmaj**, v. 161, n. 8, p. 979-980, 1999.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GONZÁLEZ DE DIOS, J.; ALONSO-ARROYO, A.; ALEIXANDRE-BENAVENT, R.. Half a century of Anales de Pediatría. Evolution of its main bibliometric indicators in the Web of Science and Scopus international databases. **Anales de Pediatría (English Edition)**, v. 90, n. 3, p. 194. e1-194. e11, 2019.

GUTIERREZ, E. C.; XIA, A.; MURPHY, J. D. Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico?. **Renewable Energy**, v. 95, p. 22-30, 2016.

HARYANTO, A. et al. Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum Purpureum*) using batch digester. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2018. p. 012011.

HASSAN, W.; KAMDEM, J. P.; DA ROCHA, J. B. T.. Research trends in chemico-biological interactions: The golden jubilee (1969–2019). *Chemico-Biological Interactions*, v. 327, p. 109177, 2020.

HUANG, C. et al. Anaerobic digestion of elephant grass hydrolysate: Biogas production, substrate metabolism and outlet effluent treatment. **Bioresource technology**, v. 283, p. 191-197, 2019.

HUANG, X. et al. Mesophilic anaerobic co-digestion of aloe peel waste with dairy manure in the batch digester: Focusing on mixing ratios and digestate stability. **Bioresource technology**, v. 218, p. 62-68, 2016.

HUDE, M. P.; YADAV, G. D. Process intensification in methane generation during anaerobic digestion of Napier grass using supercritical carbon dioxide combined with acid hydrolysis pre-treatment. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 92, n. 12, p. 2176-2184, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. **Censo agropecuário, 2017 - Lavoura temporária de cana-de-açúcar**. Coordenação de Geografia - Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/pesquisa/24/76693>>. Acesso em: 15 out. 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. **Panorama - Alagoas**. Coordenação de Geografia - Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/panorama>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. **Pecuária – Bovino, Galináceo e Suíno**. Coordenação de Geografia - Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/pesquisa/18/16459>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

IBRAHIM, S. B. S. et al. Biodigestão anaeróbia do bagaço da cana-de-açúcar pré-tratado e utilizando excretas de frango como inóculo. **PUBVET**, v. 11, p. 1188-1297, 2017.

JAMWAL, A. et al. Application of optimization techniques in metal cutting operations: A bibliometric analysis. **Materials Today: Proceedings**, n. 1, p. 7–12, 2020.

JEHLEE, A. et al. Improvement of biohythane production from *Chlorella* sp. TISTR 8411 biomass by co-digestion with organic wastes in a two-stage fermentation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 32, p. 17238-17247, 2019.

JEWELL, W. J.; CUMMINGS, R. J.; RICHARDS, B. K. Methane fermentation of energy crops: maximum conversion kinetics and in situ biogas purification. **Biomass and Bioenergy**, v. 5, n. 3-4, p. 261-278, 1993.

KEERATIURAI, P. Management of energy grasses for biogas production. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1431-1436, 2016.

KONGJAN, P. et al. Biogas Production from Single Digestion of Napier Grass Hydrolysate and Co-Digestion of Solid Fraction of Microwave Acid Pretreated Napier Grass with Swine Manure. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 46, n. 4, p. 639-652, 2019

KULLAVANIJAYA, P.; CHAVALPARIT, O. The effect of ensiling and alkaline pretreatment on anaerobic acidification of Napier grass in the leached bed process. **Environmental Engineering Research**, v. 25, n. 5, p. 668-676, 2020.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 3, p. 28-35, 2006.

LAURENT, A. et al. Ranking yields of energy crops: a meta-analysis using direct and indirect comparisons. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 46, p. 41-50, 2015.

MALANSKI, P. D.; DEDIEU, B.; SCHIAVI, S. Mapping the research domains on work in agriculture. A bibliometric review from Scopus database. **Journal of Rural Studies**, v. 81, p. 305-314, 2021.

MARAFON, A C et al. Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. **Sugarcane biorefinery, technology and perspectives**. Academic Press, 2020. p. 179-194.

MARAFON, A. C. et al. Poder calorífico do capim-elefante para a geração de energia térmica. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2016.

MARAFON, A.C. et al. Capim-elefante como matéria-prima para a produção de energia térmica. **COMITÊ CIENTÍFICO**, p. 42., 2015.

MBACHU, V. M.; IGBOANUGO, A. C.; ALUKWE, U. J. Development of enhanced substrate from fresh elephant grass for biogas production. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 8, n. 04, p. 44-49, 2019.

MD KHUDZARI, J. et al. Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using Scopus database. **Biochemical Engineering Journal**, v. 136, p. 51–60, 2018.

MENEGOL, D. et al. Second-generation ethanol production from elephant grass at high total solids. **Bioresource Technology**, v. 211, p. 280-290, 2016.

MURIANA, H. B. et al. Exigências Agroclimáticas das Culturas Energéticas no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 2, n. 4, 2013.

MUTHUDINESHKUMAR, R.; ANAND, R. Anaerobic digestion of various feedstocks for second-generation biofuel production. **In: Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment. Woodhead Publishing**, 2019. p. 157-185.

NARINTHORN, R.; CHORIT, W.; CHISTI, Y.. Alkaline and fungal pretreatments for improving methane potential of Napier grass. **Biomass and Bioenergy**, v. 127, p. 105262, 2019.

NING, J. et al. Simultaneous biogas and biogas slurry production from co-digestion of pig manure and corn straw: Performance optimization and microbial community shift. **Bioresource technology**, v. 282, p. 37-47, 2019.

OLIVEIRA, A. M. et al. Two phases fermentative process for hydrogen and methane production from cassava wastewater. **Journal of Health & Biological Sciences**, v. 5, n. 2, p. 137-141, 2017.

OLIVEIRA, M. Produção da pecuária municipal 2018. **Catalog of the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, v. 84, n. 01014234, p. 1-8, 2019.

OLIVEIRA, P. A. V. Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. **Embrapa Suínos e Aves-Documentos (INFOTECA-E)**, 1993. 188 p.

PARDANG, P. et al. Potential of Lignin-Rich Grass, *Pennisetum purpureum* × *Pennisetum typhoides*, as a Feedstock for Biogas Production. **Journal of Environmental Engineering**, v. 146, n. 8, p. 04020074, 2020.

PARSAEE, M.; KIANI, M. K. D.; KARIMI, K.. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and bioenergy**, v. 122, p. 117-125, 2019.

PHUTTARO, C. et al. Integrative effects of sonication and particle size on biomethanation of tropical grass *Pennisetum purpureum* using superior diverse inocula cultures. **Energies**, v. 12, n. 22, p. 4226, 2019a.

PHUTTARO, C. et al. Anaerobic digestion of hydrothermally-pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield. **Bioresource technology**, v. 284, p. 128-138, 2019b..

PIÑAS, J. A. V. et al. Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. **Renewable Energy**, v. 117, p. 447-458, 2018.

PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M.; SILVA, J. F. Estudo da variação da concentração de metano no biogás produzido a partir das águas residuárias do café. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 475-484, 2010

PRAPINAGSORN, W.; SITTIJUNDA, S.; REUNGSANG, A. Co-digestion of napier grass and its silage with cow dung for methane production. **Energies**, v. 10, n. 10, p. 1654, 2017.

PRAPINAGSORN, W.; SITTIJUNDA, S.; REUNGSANG, A. Co-digestion of napier grass and its silage with cow dung for bio-hydrogen and methane production by two-stage anaerobic digestion process. **Energies**, v. 11, n. 1, p. 47, 2018.

QUESADA, D. M. et al. Parâmetros qualitativos de genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) estudados para a produção de energia através da biomassa. **Embrapa Agrobiologia-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2004.

REKHA, B. N.; PANDIT, A. B. Performance enhancement of batch anaerobic digestion of napier grass by alkali pre-treatment. **International Journal of ChemTech Research**, v. 5, n. 2, p. 558-564, 2013.

RESCH, G. et al. Potentials and prospects for renewable energies at global scale. **Energy policy**, v. 36, n. 11, p. 4048-4056, 2008.

ROCHA-MENESES, L. et al. Bioenergy yields from sequential bioethanol and biomethane production: An optimized process flow. **Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 272, 2020.

RÖSCH, C.; AUST, C.; JÖRISSEN, J. Envisioning the sustainability of the production of short rotation coppice on grassland. **Energy, Sustainability and Society**, v. 3, n. 1, p. 1-17, 2013.

SAMSON, R.; MANI, S.; BODDEY, R. et al. The potential of c4 perennial grasses for developing a global. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.24, p.1-35, 2005.

SÁNCHEZ, A. D. et al. Bibliometric analysis of publications on wine tourism in the databases Scopus and WoS. *European Research on Management and Business Economics*, v. 23, n. 1, p. 8-15, 2017.

SARITPONGTEERAKA, K. et al. Comparing Low-Temperature Hydrothermal Pretreatments through Convective Heating versus Microwave Heating for Napier Grass Digestion. **Processes**, v. 8, n. 10, p. 1221, 2020.

SAWATDEENARUNAT, C. et al. Anaerobic biorefinery: current status, challenges, and opportunities. **Bioresource technology**, v. 215, p. 304-313, 2016.

SAWATDEENARUNAT, C. et al. Decentralized biorefinery for lignocellulosic biomass: Integrating anaerobic digestion with thermochemical conversion. *Bioresource technology*, v. 250, p. 140-147, 2018.

SCHOLL, A. L. et al. Ethanol production from sugars obtained during enzymatic hydrolysis of elephant grass (*Pennisetum purpureum*, Schum.) pretreated by steam explosion. **Bioresource Technology**, v. 192, p. 228-237, 2015.

SENAI. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Departamento Regional do Paraná. **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná**. Curitiba, PR. 2016. 144 p.

SHILPI, S. et al. Waste to watt: Anaerobic digestion of wastewater irrigated biomass for energy and fertiliser production. **Journal of environmental management**, v. 239, p. 73-83, 2019.

SHIRALIPOUR, A.; SMITH, P. H. Conversion of biomass into methane gas. **Biomass**, v. 6, n. 1-2, p. 85-92, 1984.

SILVA, S. et al. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 849-856, 2015.

SINBUATHONG, N.; SANGSIL, Y.; SAWANON, S. Biogas production from napier grass at various cutting intervals. **In:Energy, transportation and global warming.**, p. 375-385, 2016.

SOLTAN, Y. A. et al. Response of different tropical pasture grass species to treatments with fibrolytic enzymes in terms of in vitro ruminal nutrient degradation and methanogenesis. **Animal Nutrition and Feed Technology**, v. 13, n. 3, p. 551-568, 2013.

STECHER, K.; BROSOWSKI, A.; THRÄN, D. Biomass potential in Africa. **International Renewable Energy Agency (IRENA)**, p. 1-43, 2013

SUAISOM, P.; PHOLCHAN, P.; AGGARANGSI, P. Holistic determination of suitable conditions for biogas production from Pennisetum purpureum x Pennisetum americanum liquor in anaerobic baffled reactor. **Journal of environmental management**, v. 247, p. 730-737, 2019.

SUAISOM, P. et al. Optimization of Hydrothermal Conditioning Conditions for Pennisetum purpureum x Pennisetum americanum (Napier PakChong1 grass) to Produce the Press Fluid for Biogas Production. **Adapting to Challenges**, p. 109, 2019.

SURENDRA, K. C. et al. Anaerobic digestion of high-yielding tropical energy crops for biomethane production: Effects of crop types, locations and plant parts. **Bioresource technology**, v. 262, p. 194-202, 2018

SURENDRA, K. C.; KHANAL, S. K.. Effects of crop maturity and size reduction on digestibility and methane yield of dedicated energy crop. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 187-193, 2015.

THAEMNGOEN, A. et al. Anaerobic digestion of napier grass (Pennisetum purpureum) in two-phase dry digestion system versus wet digestion system. **BioEnergy Research**, v. 13, n. 3, p. 853-865, 2020

TONG, X.; SMITH, L. H.; MCCARTY, P. L. Methane fermentation of selected lignocellulosic materials. **Biomass**, v. 21, n. 4, p. 239-255, 1990.

TSAI, F. M. et al. Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 124-132, 2020.

USMAN, M.; HO, Y.. A bibliometric study of the Fenton oxidation for soil and water remediation. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110886, 2020.

WANG, Z. et al. Mesophilic anaerobic co-digestion of acorn slag waste with dairy manure in a batch digester: Focusing on mixing ratios and bio-based carbon accelerants. **Bioresource technology**, v. 286, p. 121394, 2019.

WEN, B. et al. Comparison and evaluation of concurrent saccharification and anaerobic digestion of Napier grass after pretreatment by three microbial consortia. **Bioresource technology**, v. 175, p. 102-111, 2015.

WILKIE, A. et al. Enhancement of anaerobic methanogenesis from napiergrass by addition of micronutrients. **Biomass**, v. 11, n. 2, p. 135-146, 1986.

WU, P. et al. Effects of fermentative and non-fermentative additives on silage quality and anaerobic digestion performance of Pennisetum purpureum. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122425, 2020.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.

APÊNDICE A – Potenciais energéticos das microrregiões alagoanas considerando o efetivo de rebanho e a capacidade de produção de capim-efefante.

Tabela A -1: Potencial energético a partir da co-digestão anaeróbia de dejetos da bovinocultura e silagem de capim-efefante no Estado de Alagoas.

Microrregião	Efetivo de rebanho	Produção diária de esterco (kg/dia)	Quantidade de silagem (kg/dia)	Produção de biogás esterco (m ³ /dia)	Produção de biogás silagem (m ³ /dia)	Produção de biogás total (m ³ /dia)	Produção total CH ₄ (m ³ /dia)	Energia Térmica (MJ/dia)	Energia elétrica (kw)	Potencial Energia elétrica em 2019 (GWh)
Alagoana do Sertão do São Francisco	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arapiraca	12623	157781,88	62549,80	5995,71	3940,64	9936,35	6458,63	229475,01	693,21	5,77
Batalha	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Litoral Norte Alagoano	2338	29230,75	11588,01	1110,77	730,04	1840,81	1196,53	42512,66	128,42	1,07
Maceió	2745	34312,50	13602,58	1303,88	856,96	2160,84	1404,54	49903,46	150,75	1,25
Mata Alagoana	23226	290320,31	115092,29	11032,17	7250,81	18282,99	11883,94	422236,43	1275,51	10,61
Palmeira dos Índios	2957	36965,13	14654,16	1404,67	923,21	2327,89	1513,13	53761,39	162,40	1,35
Penedo	10481	131015,47	51938,74	4978,59	3272,14	8250,73	5362,97	190546,45	575,61	4,79
Santana do Ipanema	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
São Miguel dos Campos	12447	155590,82	61681,20	5912,45	3885,92	9798,37	6368,94	226288,38	683,58	5,69
Serrana do Sertão Alagoano	619	7740,27	3068,49	294,13	193,32	487,45	316,84	11257,31	34,01	0,28
Serrana dos Quilombos	13756	171946,97	68165,30	6533,98	4294,41	10828,40	7038,46	250076,45	755,44	6,29
Traipu	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela A - 2: Potencial energético a partir da co-digestão anaeróbia de dejetos da suinocultura e silagem de capim-elefante no Estado de Alagoas.

Microrregião	Efetivo de rebanho	Produção diária de esterco (kg/dia)	Quantidade de silagem (kg/dia)	Produção de biogás esterco (m ³ /dia)	Produção de biogás silagem (m ³ /dia)	Produção de biogás total (m ³ /dia)	Produção total CH ₄ (m ³ /dia)	Energia Térmica (MJ/dia)	Energia elétrica (kw)	Potencial Energia elétrica em 2019 (GWh)
Alagoana do Sertão do São Francisco	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arapiraca	14872	34949,49	35243,91	2761,01	2220,37	4981,38	3237,89	115042,40	347,52	2,89
Batalha	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Litoral Norte Alagoano	2071	4867,48	4908,48	384,53	309,23	693,76	450,95	16022,15	48,40	0,40
Maceió	1628	3825,23	3857,45	302,19	243,02	545,21	354,39	12591,42	38,04	0,32
Mata Alagoana	12921	30364,55	30620,35	2398,80	1929,08	4327,88	2813,12	99950,26	301,93	2,51
Palmeira dos Índios	643	1511,60	1524,33	119,42	96,03	215,45	140,04	4975,69	15,03	0,13
Penedo	4993	11733,99	11832,84	926,99	745,47	1672,45	1087,10	38624,51	116,68	0,97
Santana do Ipanema	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
São Miguel dos Campos	6140	14428,57	14550,11	1139,86	916,66	2056,51	1336,73	47494,16	143,47	1,19
Serrana do Sertão Alagoano	1295	3042,86	3068,49	240,39	193,32	433,70	281,91	10016,11	30,26	0,25
Serrana dos Quilombos	15914	37397,16	37712,20	2954,38	2375,87	5330,24	3464,66	123099,32	371,86	3,09
Traipu	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela A - 3: Potencial energético a partir da co-digestão anaeróbia de dejetos da avicultura e silagem de capim-elefante no Estado de Alagoas.

Microrregião	Efetivo de rebanho	Produção diária de esterco (kg/dia)	Quantidade de silagem (kg/dia)	Produção de biogás esterco (m³/dia)	Produção de biogás silagem (m³/dia)	Produção de biogás total (m³/dia)	Produção total CH₄ (m³/dia)	Energia Térmica (MJ/dia)	Energia elétrica (kw)	Potencial Energia elétrica em 2019 (GWh)
Alagoana do Sertão do São Francisco	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arapiraca	1030362	154554,29	367162,17	7727,71	23131,22	30858,93	20058,31	712671,58	2152,86	17,92
Batalha	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Litoral Norte Alagoano	105445	15816,69	37574,43	790,83	2367,19	3158,02	2052,72	72932,98	220,32	1,83
Maceió	35125	5268,68	12516,37	263,43	788,53	1051,97	683,78	24294,61	73,39	0,61
Mata Alagoana	427651	64147,71	152390,54	3207,39	9600,60	12807,99	8325,19	295794,11	893,54	7,44
Palmeira dos Índios	11014	1652,03	3924,60	82,60	247,25	329,85	214,40	7617,75	23,01	0,19
Penedo	838266	125739,84	298710,00	6286,99	18818,73	25105,72	16318,72	579804,09	1751,49	14,58
Santana do Ipanema	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
São Miguel dos Campos	370101	55515,11	131882,78	2775,76	8308,62	11084,37	7204,84	255988,00	773,30	6,44
Serrana do Sertão Alagoano	8611	1291,66	3068,49	64,58	193,32	257,90	167,63	5956,03	17,99	0,15
Serrana dos Quilombos	657757	98663,61	234387,18	4933,18	14766,39	19699,57	12804,72	454951,78	1374,33	11,44
Traipu	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).