



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



VICTOR CARLOS DE LIMA ARRUDA

**ANÁLISE DO POTENCIAL BIOENERGÉTICO ANIMAL BRASILEIRO A PARTIR
DA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE BIODIGESTÃO**

JOÃO PESSOA – PB

2024

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° 115

VICTOR CARLOS DE LIMA ARRUDA

**ANÁLISE DO POTENCIAL BIOENERGÉTICO ANIMAL BRASILEIRO A PARTIR
DA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE BIODIGESTÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Taynara Geysa Silva do Lago

JOÃO PESSOA – PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A779a Arruda, Victor Carlos de Lima.

Análise do potencial bioenergético animal brasileiro a partir da avaliação de biodigestão / Victor Carlos de Lima Arruda. - João Pessoa, 2024.

129 f. : il.

Orientação: Taynara Geysa Silva do Lago.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Bioenergia. 2. Energia renovável. 3. Biohidrogênio. 4. Bioeconomia. 5. Mapeamento de recursos. I. Lago, Taynara Geysa Silva do. II. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)



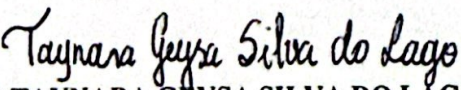
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

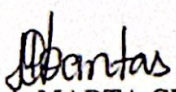
ATA nº 115 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

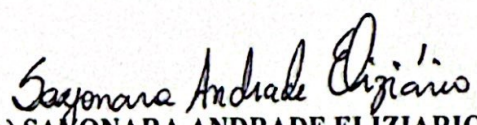
Ao vigésimo quinto dia do mês de julho de dois mil e vinte e quatro foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, as 09h00, no Auditório do Centro de Energias Alternativas e Renováveis a que se submeteu a defesa pública de VICTOR CARLOS DE LIMA ARRUDA, matrícula 20221004288, com o título "ANÁLISE DO POTENCIAL BIOENERGÉTICO ANIMAL BRASILEIRO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE BIODIGESTÃO". A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO (UFPB), MARTA CELIA DANTAS (UFPB), SAYONARA ANDRADE ELIZIARIO (UFPB) e GLAUBER CRUZ (UFMA). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi aprovado pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

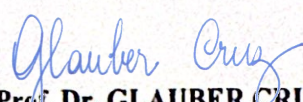
Observações: _____

Membros da Banca Examinadora:


Prof.ª. Dr.(a) TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO
Orientador(a)


Prof.ª. Dr.(a) MARTA CELIA DANTAS
Examinador(a) Externo(a)


Prof.ª. Dr.(a) SAYONARA ANDRADE ELIZIARIO
Examinador(a) Externo(a)


Prof. Dr. GLAUBER CRUZ
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

A ele, meu herói, exemplo de paternidade, de compaixão, de servidão e de tudo o que mais
puder se imaginar de bom, meu Avô, **Arlindo Paulo de Lima**, in memoriam, dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte do amor e é quem me mantém neste bom propósito.

Agradeço também a minha mãe, Aldira, a quem sempre me cobra pelo foco na evolução profissional e acadêmica, tentando me manter nos trilhos.

Agradeço ao meu irmão, Gabriel, pelo braço forte sempre que preciso;

Agradeço também as amigas Josicleide e Clarisse pela ajuda e apoio nessa caminhada na pós-graduação.

Por fim, e não menos importante, agradeço a minha orientadora, Professora Taynara Lago pela paciência, pela esperança para comigo e pelo apoio de sempre.

Grato!

“...a alegria do Senhor será a vossa força” (Ne 8,10).

RESUMO

A biomassa, matéria orgânica vinda de animais, vegetais e algas, pode ser utilizada para obter biocombustíveis, como biogás, bioetanol, hidrogênio de baixo carbono e outros. O objetivo dessa pesquisa foi analisar a disposição, potencial e a sustentabilidade da produção energética da biomassa animal por meio da digestão anaeróbia. Neste trabalho, busca-se apresentar as condições da bioenergia animal em quatro capítulos. No primeiro, foi estimado o potencial Bioenergético animal (biogás de esterco animal) entre os anos de 2000 e 2020, no estado brasileiro da Paraíba. Os resultados mostraram que potencialmente o rebanho bovino pode compor 75% do potencial técnico gerador de eletricidade, equivalente o suficiente para abastecer no ano de 2020, todo o setor residencial estadual. O segundo capítulo analisa a presença espacial e locacional do potencial bioenergético nos municípios, regiões imediatas e intermediárias. Observou-se que a Paraíba potencialmente possui uma geração média anual de 31,3 PJ, sendo a região imediata de Campina Grande a mais significativa. O terceiro capítulo apresenta uma revisão bibliométrica em busca de novas perspectivas para aproveitamento da biomassa, como a produção de hidrogênio verde a partir da mesma. A expansão dessas pesquisas mais recentes vem crescendo consideravelmente ano após ano e indicam um caminho de acoplamento de processos para produção de biogás e hidrogênio verde como meio eficiente. O quarto trabalho simula cenários de viabilidade técnica, financeira e ambiental para a instalação de um plantel suíno com vistas na produção bioenergética no município de Pedras de Fogo-PB. Os resultados mostraram que 1.621 suínos são suficientes a viabilidade técnica, financeira e ambiental do negócio. A simulação apresentou que esse rebanho tem o potencial de tratar 76,34 m³ de resíduos da pecuária; gerar 1,26 GWh/ano de energia elétrica, e de performar uma economia/venda potencial de R\$ 337.559,91 ao ano, com um Payback de 2 anos e 10 meses. A partir dessa pesquisa, o interesse em vocações bioeconômicas pode ser fomentado, bem como, apontar para oportunidades na agropecuária os arranjos tecnológicos em comunidades rurais, fortalecendo a economia local. Dessa forma, esse trabalho procura evidenciar cenários possíveis e sustentáveis para a produção de eletricidade e biocombustíveis.

Palavras-chave: Bioenergia. Energia renovável. Biohidrogênio. Bioeconomia. Mapeamento de Recursos.

ABSTRACT

Analysis of the Brazilian animal bioenergy potential from the evaluation of biodigestion processes

Biomass, organic matter from animals, plants and algae, can be used to obtain biofuels, such as biogas, bioethanol, low-carbon hydrogen and others. The objective of this research was to analyze the disposition, potential and sustainability of the energy production of animal biomass through anaerobic digestion. In this work, we seek to present the conditions of animal bioenergy in four chapters. In the first, the animal bioenergetic potential (animal manure biogas) between the years 2000 and 2020 in the Brazilian state of Paraíba was estimated. The results showed that potentially the cattle herd can make up 75% of the technical potential to generate electricity, equivalent enough to supply the entire state residential sector in 2020. The second chapter analyzes the spatial and locational presence of the bioenergy potential in municipalities, immediate and intermediate regions. It was observed that Paraíba potentially has an average annual generation of 31.3 PJ, with the immediate region of Campina Grande being the most significant. The third chapter presents a bibliometric review in search of new perspectives for the use of biomass, such as the production of green hydrogen from it. The expansion of these most recent research has been growing considerably year after year and indicates a path of coupling processes for the production of biogas and green hydrogen as an efficient means. The fourth work simulates technical, financial and environmental feasibility scenarios for the installation of a pig herd with a view to bioenergy production in the municipality of Pedras de Fogo-PB. The results showed that 1,621 pigs are sufficient for the technical, financial and environmental viability of the business. The simulation showed that this herd has the potential to treat 76.34 m³ of livestock waste; generate 1.26 GWh/year of electricity and perform a potential savings/sale of R\$ 337,559.91 per year, with a Payback of 2 years and 10 months. From this research, interest in bioeconomic vocations can be fostered, as well as pointing to opportunities in agriculture and technological arrangements in rural communities, strengthening the local economy. Thus, this work seeks to highlight possible and sustainable scenarios to produce electricity and biofuels.

Keywords: Bioenergy. Renewable energy. Biohydrogen. Bioeconomy. Resource Mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Geração de eletricidade a partir de fontes renováveis entre 1990 e 2020.	24
Figura 3.1 - Itinerário metodológico para a estimativa de Energia Potencial.	35
Figura 3.2 - Evolução do efetivo dos rebanhos na Paraíba.	38
Figura 3.3 - Evolução da Bioenergia animal potencial disponível na Paraíba.	39
Figura 3.4 - Evolução da EPD na Paraíba a partir dos dejetos animais.	40
Figura 3.5 - Potencial técnico de geração de eletricidade na Paraíba por meio da bioenergia.	41
Figura 3.6 - Participação dos rebanhos na PTG paraibana em 2020.	41
Figura 4.1 - Mapa de localização do estado da Paraíba e divisões territoriais.	49
Figura 4.2. Evolução do potencial energético de resíduos animais, na PJ, nas regiões imediatas da Paraíba, de 2000 a 2020.	54
Figura 4.3 - Evolução da Espacialização pelo Índice Hoover da energia potencial teórica de rebanhos nos municípios da Paraíba, no período de 2000 a 2020.	60
Figura 4.4 - Evolução da Espacialização pelo Índice Hoover da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões imediatas da Paraíba, no período de 2000 a 2020.	61
Figura 4.5 - Evolução da Espacialização pelo Índice Hoover da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões intermediárias da Paraíba, no período de 2000 a 2020.	62
Figura 4.6. Índice Krugman de energia potencial municipal de resíduos animais da Paraíba, valores médios entre 2000 e 2009.	63
Figura 4.7 - Índice Krugman da energia potencial municipal de resíduos animais na Paraíba, valores médios entre 2010 e 2019.	64
Figura 4.8 - Índice Krugman da energia potencial municipal de resíduos animais na Paraíba em 2020.	65
Figura 4.9 - Evolução da espacialização pelo Índice de Ellison-Glaeser da energia potencial teórica de rebanhos nos municípios da Paraíba, no período de 2000 a 2020.	66
Figura 4.10 - Evolução da espacialização pelo Índice de Ellison-Glaeser da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões imediatas da Paraíba, no período de 2000 a 2020.	67
Figura 4.11 - Evolução da Espacialização pelo Índice de Ellison-Glaeser da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões intermediárias da Paraíba, no período de 2000 a 2020.	68
Figura 5.1 – Fluxograma da evolução e refino da pesquisa e seleção de trabalhos.	77
Figura 5.2 – Evolução temporal dos trabalhos publicados.	78

Figura 5.3 – Diagrama de Sankey relacionando Palavras-chave, País e Periódico.....	79
Figura 5.4 - Distribuição espacial, por países, em quartis, da quantidade de publicações científicas.....	80
Figura 5.5 – Núcleo de Periódicos a partir da Lei de Bradford.....	82
Figura 5.6 – Mapa de colaboração na rede autores.	83
Figura 5.7 – Nuvens de palavras	84
Figura 6.1 - Mapa de Localização de Pedras de Fogo-PB.....	111
Figura 6.2 - Mapa de localização de domicílios adeptos ao arranjo.....	112
Figura 6.3 – Síntese dos cenários de viabilidade para os diferentes planteis exemplificados:	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Oferta energética global por tipo de fonte, em EJ, para 1971, 1981, 1991, 2001, 2011, 2019, 2020 e 2021.	22
Tabela 2.2 - Oferta elétrica no mundo por fonte em TWh, para os anos de 1980, 1990, 2000, 2010, 2019 e 2020.	23
Tabela 2.3 - Energia primaria produzida no Brasil por tipo de fonte em PJ de 1970 a 2021.	25
Tabela 2.4 - Geração de energia elétrica por tipo de fonte de 2011 a 2021, em TWh	27
Tabela 2.5 – Comparação do potencial energético de diferentes combustíveis.	30
Tabela 3.1 - Carga diária de dejetos por rebanho.	36
Tabela 3.2 - Coeficientes de Energia Potencial Disponível (EPD) por animal ao ano.	36
Tabela 3.3 - Fator de manejo para a finalidade do rebanho bovino.	37
Tabela 3.4 - Potencial técnico de Conversão de energia e equivalências energéticas em 2020.	42
Tabela 4.1 - Geração de resíduos e biogás por animal.	50
Tabela 4.2 - Coeficientes energéticos potenciais por unidade animal e por ano.	50
Tabela 4.3 - Potencial energético de resíduos animais por região imediata da Paraíba, considerando os valores médios anuais, máximos e mínimos, em PJ, no período de 2000 a 2020.	55
Tabela 4.4 - Evolução do QL do EPT por tipo de rebanho nas regiões imediata e municipal da Paraíba.	57
Tabela 5.1 – Trabalhos mais citados da amostra bibliométrica.....	81
Tabela 5.2 – Os 10 periódicos mais relevantes a partir do número de trabalhos publicados.	81
Tabela 5.3 – Os 10 autores mais relevantes da amostra	82
Tabela 6.1 – Parâmetros adotados para o cálculo da produção potencial de biogás	113
Tabela 6.2 – Parâmetros adotados para estimar a massa de nutrientes em kg/m ³	116
Tabela 6.3 – Valores de mercado dos insumos agroquímicos em 2024.....	116
Tabela 6.4 – Investimentos para aquisição dos equipamentos para o empreendimento. ..	117
Tabela 6.5 – Receitas anuais da configuração do plantel com 2000 animais no cenário 2.	121
Tabela 6.6 – Síntese dos resultados obtidos pelo método BiogásFort.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSTR – <i>Continuous Stirred Tank Reactor</i> (Reator anaeróbio de tanque completamente agitado)	POT – Potência de geração de eletricidade da planta
DA – Digestão anaeróbia	PTC – Potencial técnico de conversão elétrica
EC – Economia Circular	PTCE – Potencial técnico de produção de eletricidade
EG – Ellison-Glaeser	PTE – Potencial teórico de produção de eletricidade
EJ - Exajoule	PTG – Potencial técnico gerador de eletricidade
EPD – Energia Potencial Disponível	QL – Quociente Locacional
EPT – Energia potencial teórica	RC – Receitas anual de créditos de carbono
ER – Energias Renováveis	RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
GEE – Gases de efeito estufa	SAC - Sequestro e armazenamento de carbono
GJ - Gigajoule	SF – Sistemas fotovoltaicos
GLP – Gás liquefeito de Petróleo	SI – Índice de Krugman
GN – Gás Natural	SIDRA – Sistema de Recuperação Automática
H - Hoover	ST – Sistemas térmicos solares
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	TC – Taxa de Citações em trabalhos
IEA – <i>International Energy Agency</i>	TIR – Taxa Interna de retorno
IPPC – <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	TMA – Taxa mínima de atratividade
NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio	TWh – <i>Terawatt-hora</i>
PADS – Produção anual de dejetos suínos	VP – Valor presente
PCI – Poder Calorífico Inferior	VPL – Valor presente líquido
PDD – Produção diária de dejetos	WBA – <i>World Bioenergy Association</i>
PJ - Picojoule	WoS – <i>Web of Science</i>
PM – Produção anual de metano	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1	INTRODUÇÃO	18
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	CONTRIBUIÇÃO CIENTIFICA	20
1.4	OBJETIVOS	20
1.4.1	Objetivo Geral:	20
1.4.2	Objetivos específicos:	21
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	ENERGIA RENOVÁVEL NO MUNDO	22
2.2	ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL	25
2.3	BIOENERGIA	27
2.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA E BIOGÁS	28
2.5	HIDROGÊNIO VERDE	30
3	ARTIGO 1: BIOENERGIA ANIMAL - EVOLUÇÃO E POTENCIAL DISPONÍVEL NO ESTADO DA PARAÍBA.....	32
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	METODOLOGIA.....	35
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.4	CONCLUSÃO.....	42
3.5	REFERÊNCIAS.....	43
4	ARTIGO 2: ANÁLISE DE INDICADORES DE LOCALIZAÇÃO E ESPECIALIZAÇÃO DO POTENCIAL BIOENERGÉTICO ANIMAL NA PARAÍBA 45	
4.1	INTRODUÇÃO	46
4.2	METODOLOGIA.....	49
4.2.1	Área de estudo	49

4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.3.1	Concentração por Quociente Locacional.....	56
4.3.2	Espacialização pelo Índice Hoover.....	59
4.3.3	Dissimilaridade pelo índice de Krugman.....	62
4.3.4	Especialização pelo índice de Ellison-Glaeser	65
4.4	CONCLUSÃO.....	68
4.5	REFERÊNCIAS.....	69

5 ARTIGO 3: HIDRÔGENIO VERDE - ARRANJOS BIOENERGÉTICOS A PARTIR DE BIOPROCESSOS: UMA REVISÃO BIBLIOMETRICA..... 73

5.1	INTRODUÇÃO	74
5.2	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	76
5.3	RESULTADOS	78
5.3.1	Publicações e estruturas de citação.....	78
5.3.2	Países e regiões influentes	79
5.3.3	Análise de mapeamento científico.....	80
5.4	DISCUSSÃO	84
5.4.1	Bioenergia e Bio-hidrogênio.....	84
5.4.2	Obtenção de Biogases por meio de algas.....	86
5.4.3	Produção de Biogás e Bio-hidrogênio por meio da biomassa lignocelulósica	88
5.4.4	Biogás e Bio-hidrogênio por meio da agropecuária e indústrias	90
5.4.5	Resíduos periurbanos: um caminho para a bioenergia nas cidades.	92
5.4.6	Novas Perspectivas para o Bio-hidrogênio.....	93
5.5	CONCLUSÃO.....	97
5.6	REFERÊNCIAS.....	99
5.7	APÊNDICE	104

6 ARTIGO 4: SIMULAÇÃO DO POTENCIAL BIOECONÔMICO E ENERGÉTICO DE DEJETOS ANIMAIS EM COMUNIDADES RURAIS. 107

6.1	INTRODUÇÃO	109
6.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	110

6.2.1	Caracterização do estudo	110
6.2.2	Plantel de animais	112
6.2.3	Análise da Viabilidade e construção dos cenários.....	113
6.2.4	Módulo 1 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS E DESTINAÇÃO: Cálculo da população e carga de efluentes/resíduos aproveitados/tratados para o beneficiamento escolhido.....	113
6.2.5	Módulo 2 - ESTRUTURA DE TRATAMENTO E BENEFICIAMENTO: Estimativa dos orgânicos transformados e bioprodutos potencialmente obtidos.	114
6.2.6	Módulo 3 – RECEITAS.....	116
6.2.7	Módulo 4 – DESPESAS	117
6.2.8	Viabilidade Técnica	117
6.2.9	Viabilidade Econômica.....	118
6.2.10	Viabilidade Ambiental.....	119
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	119
6.3.1	Cenário 1.....	120
6.3.2	Cenário 2.....	120
6.3.3	Cenário 3.....	121
6.3.4	Resultados comparados.....	122
6.4	CONCLUSÃO.....	125
6.5	REFERÊNCIAS.....	126
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
8	REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

O aumento contínuo das emissões de gases, em especial o CO₂, que desde a revolução industrial trouxe um desequilíbrio entre as fontes e os sumidouros de CO₂ atmosférico, juntamente com a crescente demanda de energia e a geração de resíduos levaram a humanidade a um estado de emergência climática. Para enfrentar os efeitos das mudanças do clima no planeta, o mais grave problema do século 21, são requeridos esforços conjuntos dos profissionais da ciência, dos mandatários e representantes da sociedade (Annie Modestra *et al.*, 2022; Romero-Perdomo *et al.*, 2022).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC aponta que a principal causa da mudança do clima no mundo são os processos antropogênicos. Em 2019, houve um crescimento das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE) em 1,1%, 57,4 GtCO₂, montante 59% maior do que em 1990 e 44% maior do que em 2000.

O consumo excessivo de combustíveis fósseis elevou a temperatura do planeta em 1,9 °C, causando efeitos severos sobre a vida e a biodiversidade. Desse modo, 196 países concordaram em contribuir para a gestão das mudanças climáticas e a diminuição das emissões de GEE firmando o Acordo de Paris, que visou limitar o aumento da temperatura global a menos de 1,5 °C até o 2050, junto de uma economia de baixo carbono (Umar *et al.*, 2020; United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, 2015).

Até 2030, o consumo de energia crescerá cerca de 80%, com o consumo dos países emergentes ultrapassando os países industrializados. Prevê-se que o gás natural seja o combustível de crescimento mais rápido entre 2000 e 2030, e o consumo de petróleo aumentará com a pressão do setor de transportes. Espera-se também que as Energias Renováveis (ER) cresçam principalmente na oferta de eletricidade. Para abranger a demanda energética, as ER deverão fornecer 90% de toda a eletricidade no globo até 2050. O foco deve ser em diversificar as fontes energéticas, desse modo, a diversificar as economias, proteger-se das oscilações dos preços, criar postos de trabalho e reduzir a pobreza, ao mesmo tempo que aliviam a dependência das importações, assim proporcionando segurança energética (International Renewable Energy Agency - IRENA, 2021; Rabbi *et al.*, 2022; United Nations, 2023).

As fontes de energia renováveis incluem a biomassa convencional e a moderna, biocombustíveis, energia hidrelétrica, energia eólica, calor geotérmico e sistemas solares. Espera-se que o mercado global de biocombustíveis cresça com uma taxa de crescimento anual

composta de 8% entre 2019 e 2024. Globalmente, se prevê que mais de 90% dos bens produzidos pelo petróleo possam ser gerados a partir de recursos renováveis; sejam ainda cerca de 33% dos produtos químicos e outros materiais e 50% do mercado medicinal possam ser de base biológica até 2030 (Shahid *et al.*, 2021).

Como alternativa para reduzir as emissões de GEE, além das ER, surge a Economia Circular (EC), com o propósito de substituir o modelo tradicional de produção e consumo para um modelo mais sustentável. A EC visa uma mudança da lógica econômica linear e extrativista, baseando-se na reutilização de recursos biológicos e tecnológicos pelo maior tempo possível em sistema de circuito fechado (Romero-Perdomo *et al.*, 2022).

A bioeconomia é um movimento global que tem o objetivo de construir uma plataforma para a mitigação das mudanças climáticas por meio da pesquisa, educação e tecnologia para a promoção e o desenvolvimento de energias renováveis, principalmente, a partir da biomassa. Na concepção bioeconômica atual a biomassa dos setores agrícola e florestal é considerada a matéria-prima mais abundante. Entretanto, o uso de produtos de origem animal nos processos de produção é pouco abordado, principalmente devido a uma análise dos efeitos ambientais negativos de uma nutrição dominada pela carne, que é difícil de integrar em um modelo de bioeconomia (Perišić *et al.*, 2022).

A bioeconomia e a economia circular tendem a convergir dado a integração dos aspectos econômicos da economia circular e da sustentabilidade da bioeconomia. A internacionalização das diferentes bioeconomias é uma prioridade na formação da bioeconomia circular (Popp *et al.*, 2021).

A partir de matéria biológica – biomassa - pode-se obter um combustível, denominado como biocombustível, e se diferencia do homólogo fóssil desde a matéria prima – energia primária - no processo de produção e na velocidade de reabastecimento. Os biocombustíveis utilizam a biomassa derivada de plantas, animais e algas. Os biocombustíveis incluem o bioetanol, biobutanol, biodiesel, biogás e entre outros (Abraham *et al.*, 2020).

Para Karmakar A.; Karmakar S.; Mukherjee (2010) a gordura, o esterco e resíduos animais são os principais contribuintes na produção de biocombustíveis. Segundo Neshat *et al.*, (2017) o biogás é o principal produto de origem animal que é produzido durante a digestão anaeróbia do esterco animal. Os resíduos animais são ricos em nitrogênio e pobres em carbono, a relação carbono/nitrogênio no estrume animal é inadequada para a digestão anaeróbia. Tal deficiência pode ser compensada pela adição de outro substrato rico em carbono, como biomassa lignocelulósica no reator (Shahid *et al.*, 2021). Outra grande fonte de biocombustíveis

são as plantas e frutos oleaginosos, como girassol, soja, coqueiros, nozeiras, dendeeiros e oliveiras (Russo *et al.*, 2012).

Diante do contexto da emergência climática e necessidade da evolução do uso de energias limpas e renováveis, o presente trabalho visou analisar e discutir a disposição, o potencial e a sustentabilidade da produção energética da biomassa animal utilizando a digestão anaeróbia.

1.2 JUSTIFICATIVA

A descarbonização e a diversificação da matriz energética são urgentes para a segurança nacional e minimizar os riscos de desabastecimento (Fortes, 2024; Rocha, 2024). O Brasil possui um grande potencial bioenergético ainda muito inexplorado, principalmente no que diz respeito a bioenergia animal. Embora a matriz elétrica seja majoritariamente renovável, grande parte pelas usinas hidrelétricas, a matriz energética é majoritariamente composta por combustíveis fósseis (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2024). Os biocombustíveis, esses derivados da conversão da biomassa, são uma alternativa para substituição dos combustíveis fósseis desde o setor de transportes até o elétrico (Sharmila; Shanmugavel; Banu, 2024). O processo de pesquisa e divulgação acerca de potenciais bioenergéticos é um ânimo para futuros investimentos em energia renovável, sobretudo de base orgânica.

1.3 CONTRIBUIÇÃO CIENTIFICA

A observação da vanguarda científica é importante para entender onde se está e onde deve-se avançar. Em termos de bioenergia novas combinações e acoplamentos de diferentes processos para diferentes misturas são praticados, cabendo a comunidade científica a divulgação. Esse trabalho pretende estudar o quanto o Brasil e o Estado da Paraíba, possuem em bioenergia animal a ser explorada. Além de apresentar cenários que sejam eficientes e sustentáveis para oportunidades bioeconômicas de beneficiamento da biomassa e geração de energia.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral:

Analisar a disposição, potencial e a sustentabilidade da produção energética da biomassa animal por meio da digestão anaeróbia no Estado da Paraíba.

1.4.2 Objetivos específicos:

1. Avaliar a produção científica nacional e internacional acerca da produção energética a partir da biomassa por meio da digestão anaeróbia de resíduos animais entre 2002 e 2022;
2. Estimar o potencial energético da biomassa animal no Estado da Paraíba e evolução no tempo;
3. Mapear regiões para empreendimentos energéticos da biomassa animal por meio de indicadores econômicos regionais;
4. Propor cenários sustentáveis para a implantação de empreendimentos produtores de energia a partir da biomassa animal por meio da biodigestão anaeróbica.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa pesquisa foi realizada a partir de objetos de estudo que foram moldados paralelamente e/ou sequencialmente e interdependentemente. Tais objetos de estudos são os objetivos específicos, dos quais deram origem a artigos. Ambos os artigos possuem uma base comum, dá qual se subsidia a pesquisa e se conecta os objetos desse trabalho. Esse documento é composto por uma Introdução Geral, um Referencial Teórico e por 4 Artigos apresentados aqui como capítulos, além das considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA RENOVÁVEL NO MUNDO

A oferta global de energia em 1971 foi de $2,305 \times 10^{11}$ GJ. Enquanto em 2021, a oferta energética global foi de $6,242 \times 10^{11}$ GJ, o que representou um crescimento de médio de $7,87 \times 10^9$ GJ a cada ano (International Energy Agency, 2022c).

A energia demandada e consumida no globo vem crescendo ano a ano, sem cessar nos últimos 40 anos, com exceção dos anos de 2009 e 2020. Em 2009, o mundo sofria os efeitos da crise global financeira bem como com a queda do preço dos barris de petróleo e a consequente alta no custo da energia provocando a diminuição da disponibilidade. Em 2020, ano do agravamento da pandemia do Covid-19, com os efeitos do *Lockdown*, das barreiras sanitárias e a consequente paralisação das atividades comerciais e industriais, houve uma diminuição abrupta na demanda global de energia, especialmente para carvão, petróleo e gás (Aktar; Alam; Al-Amin, 2021; Ali Bekhet; Yasmin, 2014; Internacional Energy Agency, 2022c).

A Tabela 2.1 mostra a oferta de energia global por fonte de energia para cada início de década, desde 1971 até 2021. Observa-se que a oferta energética é majoritariamente feita por petróleo, carvão e gás natural. Em 50 anos, 1971 a 2021, observou-se um aumento na participação das energias renováveis ao longo do tempo. Segundo o relatório *World Energy Outlook 2022*, feito pela IEA, as fontes de energia renovável ofertaram no mundo $7,4 \times 10^{10}$ GJ em 2021, cerca de 12% de participação. A maior parcela da energia renovável se ofertou por meio da bioenergia sólida moderna, cerca de $3,6 \times 10^{10}$ GJ.

Tabela 2.1 - Oferta energética global por tipo de fonte, em EJ nas décadas de 1971 a 2021.

Fontes	1971	1981	1991	2001	2011	2019	2020	2021
Carvão, turfa e Xisto	60,17	75,44	90,52	98,37	160,08	161,31	156,64	-
Petróleo bruto e hidrocarbonetos líquidos	104,11	125,70	137,68	158,65	176,39	192,52	176,36	-
Derivados do Petróleo	-2,08	-1,45	-1,71	-3,06	-2,75	-2,51	-4,08	-
Gás Natural	37,39	51,95	71,98	87,12	116,45	140,13	138,43	143,68
Nuclear	1,21	9,15	23,01	28,80	28,20	30,46	29,20	-
Renováveis e Resíduos	29,65	37,59	47,09	53,27	67,35	85,85	87,97	-
Total	230,46	298,38	368,57	423,19	545,77	607,90	584,62	624,16

Fonte: Internacional Energy Agency, (2022b)

Todas as fontes de energia não renováveis diminuíram em 2020 com relação a 2019 na sua oferta, com exceção das fontes renováveis e resíduos, que aumentaram em cerca de 1%.

No ano de 2020 a maior oferta dentre as fontes foi de Petróleo bruto, hidrocarbonetos líquidos e matérias-primas de refinarias, 176,4 EJ, valor equiparado com o ano de 2011. Dentre as fontes de energias renováveis (ER), os biocombustíveis e resíduos fizeram a maior oferta, 57,51 EJ em 2020, sem crescimento expressivo se comparado com 2019, 57,14 EJ. Os biocombustíveis e resíduos tiveram uma participação de 15% na matriz energética mundial em 2020. Seguem em ordem de significância na oferta a energia hidráulica, 15,63 EJ e as energias solar, eólica e outras fontes renováveis com 14,83 EJ. As energias solar e eólica foram as fontes que mais cresceram sua oferta, quando comparada com as outras ER, cerca de 1,1% em relação a 2019 (Internacional Energy Agency, 2022c).

Por outro lado, no âmbito da Tabela 2.2 mostra a matriz elétrica no mundo em TWh, para os anos de 1980, 1990, 2000, 2010, 2019 e 2020. Majoritariamente, a oferta de eletricidade foi feita pelos combustíveis fósseis, 63,1%, no ano de 2019 e 61,6% em 2020. As fontes de energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço na matriz elétrica, com uma participação de 28% (Internacional Energy Agency, 2022c).

Tabela 2.2 - Oferta elétrica no mundo por fonte em TWh, para os anos de 1980, 1990, 2000, 2010, 2019 e 2020.

Fontes	1980	1990	2000	2010	2019	2020
Combustíveis fósseis	5794	7501	9954	14494	17014	16455
Nuclear	713	2013	2591	2756	2789	2674
Fontes renováveis	1772	2295	2828	4201	7032	7482
Total	8282	11844	15428	21539	26958	26721

Fonte: Internacional Energy Agency, (2022b).

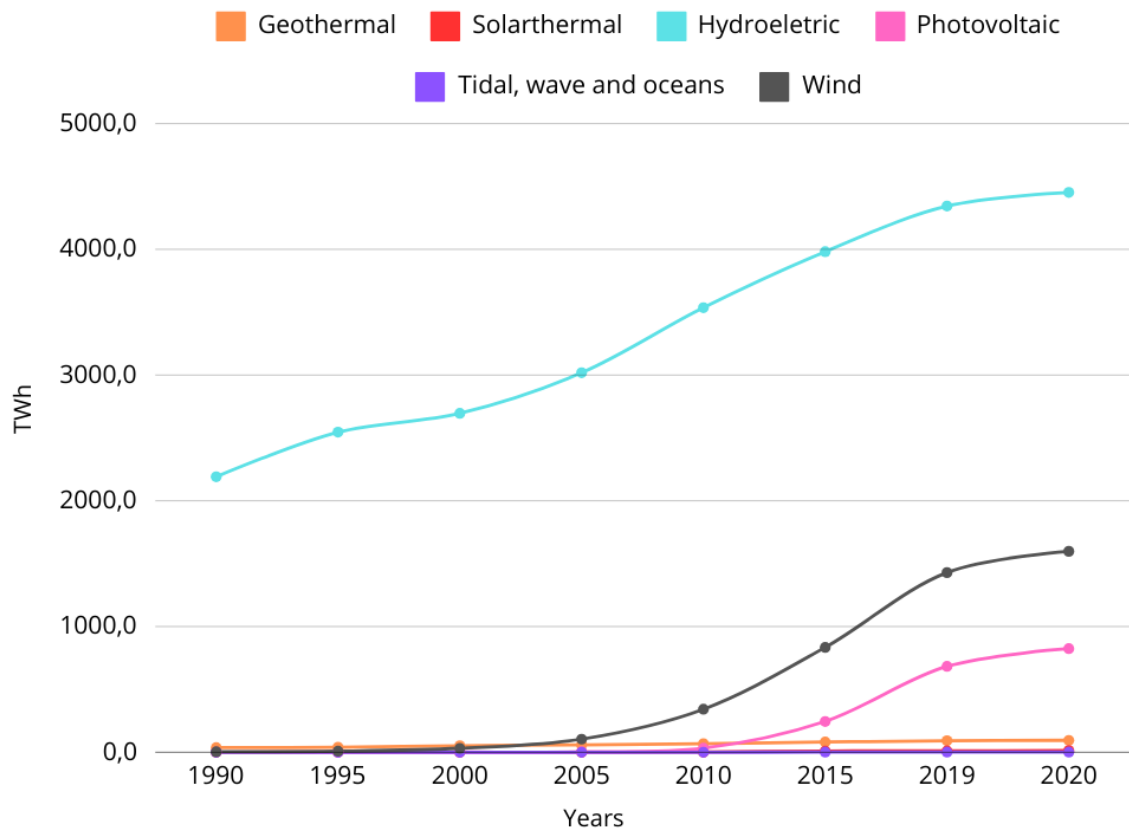
Em 2020, a geração de eletricidade por biocombustíveis e resíduos ocorreu principalmente por biocombustíveis sólidos, cerca de 471,1 TWh. Seguido de biocombustíveis gasosos, 87,7 TWh e de resíduos municipais, 38,1 TWh. Os resíduos industriais geraram 36,6 TWh e os biocombustíveis líquidos 10,4 TWh (Internacional Energy Agency, 2022a).

A eletricidade a partir das ER continuou a crescer sua oferta no mundo, o que não foi acompanhado pela energia vinda dos combustíveis fósseis. A energia hidráulica representou, em 2020, cerca de 64% da ER excetuando a produção de biocombustíveis ofertadas no globo. Seguida da energia eólica, 23% e da fotovoltaica 12%.

A Figura 2.1 mostra o gráfico do crescimento da oferta de energia elétrica no mundo por meio de energias renováveis. Houve uma aceleração a partir do novo milênio principalmente na energia eólica e fotovoltaica. O crescimento médio anual da energia hidráulica desde 1990 até 2020 foi de 107,7 TWh. Para a energia eólica foi de 75,9 TWh ao ano

em média, enquanto para a energia fotovoltaica foi de 39,2 TWh. A geração de eletricidade a partir da ER no mundo cresceu, entre o ano 2000 até 2020, 151% quando excetuados os biocombustíveis e resíduos (Internacional Energy Agency, 2022a).

Figura 2.1 – Geração de eletricidade a partir de fontes renováveis entre 1990 e 2020.



Fonte: Internacional Energy Agency, (2022a).

2.2 ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL

A produção primária de energia entre 1970 e 2021 no Brasil foi de 2077,9 PJ para 14090,6 PJ, um crescimento médio de 3,82% ao ano, performando um incremento médio de 231 PJ anuais. Em 1970 a matriz energética brasileira era majoritariamente renovável, equivalente a 1636,4 PJ, uma participação de 79% da produção de energia primaria. A energia não renovável na matriz em 1970 era principalmente produzida por petróleo, cerca de 341,7 PJ, uma participação de 16%. Gradualmente, as fontes renováveis foram tomando espaço na matriz energética. A energia vinda da biomassa lenhosa era a maior fonte energética até 1989, correspondendo a 29,7% de participação. Em 1990, a fonte mais significativa passou ao rol das não renováveis, o petróleo, com participação de 30,2%. Em 1996, a energia hidráulica ultrapassou a produção energética da lenha na matriz (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b).

Doravante, o ano 2000, o conjunto das fontes não renováveis passaram a produzir a maior parte da energia produzida no país. Do ano 2000 para 2021, como se observa na Tabela 2.3, a produção de energia por fontes não renováveis cresceu em média 4,5% a.a., enquanto as fontes renováveis crescem a 2,92%. No ano de 2020 a produção energética por fontes ER aumentou em 3,74% em relação ao ano de 2019, no entanto a sua participação diminuiu para 0,3% em relação ao ano anterior (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b).

Tabela 2.3 - Energia primaria produzida no Brasil por tipo de fonte em PJ de 1970 a 2021.

Fontes	1970	1980	1990	2000	2010	2019	2020	2021
Não renovável	443.4	588.6	1722.4	3381.1	5621.9	8065.6	8495.7	8526.8
Petróleo	341.7	387.5	1362.8	2673.2	4461.4	6041.7	6390.5	6296.4
Gás natural	52.5	91.6	260.9	552.0	953.4	1858.8	1938.4	2029.0
Carvão vapor	25.6	62.5	66.8	109.0	88.1	90.5	87.3	110.5
Carvão metalúrgico	21.1	41.5	13.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Urânio (U ₃ O ₈)	0.0	0.0	2.1	5.5	74.0	0.0	8.6	14.3
Outras não renováveis	2.5	5.4	16.4	41.0	45.0	74.5	70.9	76.6
Renovável	1634.5	2191.8	2786.6	3039.1	4975.2	5590.6	5799.5	5563.8
Energia hidráulica	143.3	464.1	744.3	1096.0	1452.1	1432.6	1427.2	1306.4
Lenha	1333.6	1301.4	1194.8	965.2	1088.5	1077.1	1076.4	1092.0
Produtos da cana	150.8	389.4	772.5	832.9	2045.3	2213.2	2327.8	2069.2
Eólica	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	201.6	205.4	260.3
Solar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0	38.7	60.3
Outras renováveis	6.8	36.9	75.1	144.9	381.5	642.2	723.9	775.6
Total	2077.9	2780.4	4509.1	6420.2	10597.1	13656.2	14295.2	14090.6

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022b)

Em 2020, em razão da eclosão da pandemia do coronavírus, houve uma retração de 2,2% na oferta de energia interna com relação a 2019. Todavia, houve um aumento de 2,4% na participação de renováveis na oferta interna de energia enquanto dava-se a queda das fontes não renováveis. Em 2021 a participação das renováveis na oferta interna voltou a diminuir, chegando a 44,7%, uma queda de 3,8% na participação (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b, 2022a).

Em 1970, o setor de maior consumo energético era o residencial, com 35,5%. Em 1980 o setor industrial era o setor de maior consumo, principalmente nas industriais de ferro e aço e de alimentos e bebidas. A indústria é um dos setores que mais consomem energia atualmente, seguido do setor rodoviário. Em 2021, o consumo do setor de transportes foi de 32,5% (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b).

No ano de 2021, a geração de eletricidade foi de 656,1 TWh no Brasil, 55,3% vindos de fontes hidroelétricas, com a maior parcela gerada na região Sudeste, seguida da região Nordeste com 184,5 TWh e 147,5 TWh, respectivamente. Nas regiões Norte e Sul a maior geração é também de hidrelétrica. Na região Nordeste, a maior geração elétrica ocorre pela energia eólica. Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste a geração de energia elétrica ocorre majoritariamente por termoeletricas (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b).

A Tabela 2.4 mostra a geração elétrica por fonte desde 2011 até 2021 em GWh. Pode se observar que a geração elétrica entre os anos de 2011 e 2021 teve um crescimento médio de 2,12% ao ano. As fontes não renováveis performaram 68,49 TWh em 2011 e 149,2 TWh em 2021, um incremento médio anual de 7,3 TWh na matriz elétrica (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b). O gás natural foi a fonte mais significativa do grupo, com crescimento médio anual de 13,22%. As fontes de energia renováveis geraram em 2021, 506,88 TWh. Em comparação com o ano de 2020 a geração elétrica renovável decresceu cerca de 3%. Enquanto no ano de 2020 a oferta de energia renovável para geração elétrica aumentou em 1% com relação a 2019 (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b).

Tabela 2.4 - Geração de energia elétrica por tipo de fonte de 2011 a 2021, em TWh

Fontes	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Não renovável	68.49	96.81	132.78	158.49	151.07	113.37	122.58	106.50	111.32	98.88	149.23
Óleo combustível	3.27	5.82	11.25	18.12	15.28	6.76	8.02	5.05	2.35	2.61	9.66
Gás natural	25.10	46.68	68.94	81.07	79.50	56.55	65.59	54.29	60.19	53.52	86.86
Óleo de coqueira	1.20	1.06	1.02	1.34	1.14	1.04	1.61	1.62	1.49	1.44	1.67
Carvão a vapor	6.49	8.42	14.80	18.39	19.10	17.00	16.26	14.20	15.33	11.95	17.59
Óleo diesel	8.97	10.47	10.98	13.41	10.43	5.44	4.89	5.25	5.49	5.94	8.58
Nuclear	15.66	16.04	15.45	15.38	14.73	15.86	15.74	15.67	16.13	14.05	14.70
Outras não renov.	7.81	8.32	10.35	10.78	10.89	10.71	10.47	10.41	10.34	9.38	10.17
Renovável	463.27	455.69	438.05	432.05	430.41	465.53	465.38	494.90	515.01	522.37	506.88
Energia hidráulica	428.33	415.34	390.99	373.44	359.74	380.91	370.91	388.97	397.88	396.38	362.82
Lenha	1.53	1.63	1.73	1.95	2.18	1.97	2.04	2.36	2.27	2.36	2.22
Produtos da cana	22.24	25.07	29.88	32.56	34.16	35.24	35.66	35.44	36.83	38.78	34.34
Eólica	2.70	5.05	6.58	12.21	21.63	33.49	42.37	48.48	55.99	57.05	72.29
Lixívia	7.86	8.01	8.07	10.48	11.05	12.03	11.69	14.08	13.01	14.47	15.14
Solar	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06	0.09	0.83	3.46	6.65	10.75	16.75
Outras renováveis	0.60	0.59	0.79	1.40	1.59	1.80	1.89	2.12	2.38	2.57	3.31
Total	531.76	552.50	570.83	590.54	581.49	578.90	587.96	601.40	626.33	621.25	656.11

Fonte:(Empresa de Pesquisa Energética, 2022b).

Com a escassez hídrica houve uma queda na hidreletricidade, em 2021, de 8,5% com relação a 2020. Em contrapartida, houve o aumento de outras renováveis, como a eólica em 26,7% e fotovoltaica em 55,9%. Em 2021, a renovabilidade da matriz elétrica foi 78,1%, quase 3 vezes mais a renovabilidade elétrica do mundo (Empresa de Pesquisa Energética, 2022a).

2.3 BIOENERGIA

A biomassa tem sido usada pelos seres humanos há milênios e era a principal fonte de energia antes da descoberta dos combustíveis fósseis. A bioenergia é obtida por meios tradicionais através da combustão direta de biomassa. Recentemente, a biomassa foi reintegrada no fornecimento de energia de maior escala do mundo, por meios modernos, através da gaseificação da madeira e de outros materiais, do sequestro de carbono e de biocombustíveis, como o biogás e o biodiesel (Archer, Sophie A.; Steinberger-Wilckens, 2018; Majeed; Luni; Tahir, 2022; Thiruselvi *et al.*, 2021c).

A biomassa tornou-se uma das alternativas aos combustíveis fósseis por ser uma energia renovável e sustentável, podendo reduzir as importações de combustíveis e promover a segurança energética. A energia da biomassa é obtida no consumo direto e indireto. O consumo direto é baseado na queima por aquecimento, resfriamento e processos industriais. Enquanto o consumo indireto consiste na conversão de biomassa em energia secundária. Os recursos de biomassa são acessíveis em todo o mundo, nas várias formas, tais como resíduos animais, resíduos sólidos urbanos, resíduos agrícolas – a forma mais abundante - efluentes industriais e águas residuais (Amin *et al.*, 2017a; Majeed; Luni; Tahir, 2022; Thiruselvi *et al.*, 2021c).

Em 2019, a oferta de recursos em todo o mundo para bioenergia foi principalmente a biomassa tradicional, cerca de 85%, que vem do setor florestal e inclui pellets, cavacos e detritos de madeira. Para a geração de energia, o setor florestal também tem uma participação maior, com cerca de 68%, seguido pelo setor de resíduos sólidos urbanos e industriais, com 17%, e biogás, com 13% (World Bioenergy Association - WBA, 2021).

Biocombustível é um termo utilizado para designar um combustível que tem aplicação no setor de energia e que é obtido através de uma fonte renovável, a biomassa. Este tipo de combustível tem a vantagem de ser menos poluente do que os combustíveis fósseis, reduzindo assim as emissões de gases com efeito de estufa (Ke *et al.*, 2022).

O setor de transportes no Brasil possui uma matriz energética muito diversificada (etanol, biodiesel, óleo diesel, gás natural, gasolina, querosene de aviação e outros biocombustíveis). Os biocombustíveis são responsáveis pela reposição de cerca de 22% do percentual de combustíveis derivados do petróleo no Brasil em 2021, o etanol e o biodiesel se consolidam no cenário nacional e desempenham um papel fundamental e estratégico em relação direta ao projeto de descarbonização brasileiro (EPE, 2022).

O RenovaBio é uma política de implementação de biocombustíveis no Brasil, na qual reconhece a importante contribuição para a implementação dos acordos firmados pelo Brasil no Acordo de Paris, proporcionando assim uma expansão da produção de biocombustíveis no país e, consequentemente, reduzindo a produção de combustíveis fósseis. A política da RenovaBio envolve a criação de objetivos voltados para a descarbonização do setor de combustíveis, emissão de certificados aos produtores de biocombustíveis e geração de créditos de descarbonização e que podem fazer a venda desses créditos no mercado, estimulando a expansão da produção e comercialização de biocombustíveis no Brasil (Agência Nacional do Petróleo - ANP, 2022).

2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA E BIOGÁS

A digestão anaeróbia (DA) é um processo derivado do metabolismo microbiano que produz biogás (metano) a partir da conversão de matéria orgânica. O processo ocorre na ausência de oxigênio, envolvendo diferentes grupos microbianos, sendo cada um responsável pela degradação de uma categoria de compostos orgânicos presentes no sistema. O processo ocorre em 4 etapas, que são hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Ottoni *et al.*, 2022).

Na primeira fase, a hidrólise, as enzimas hidrolíticas decompõem substratos orgânicos complexos (proteínas, carboidratos e gorduras) em aminoácidos e monômeros. E então de forma interdependente, inicia-se a segunda fase, a Acidogênese, monômeros solubilizados liberados do processo de hidrólise são ainda degradados em ácidos graxos de cadeia curta, álcoois e cetonas por bactérias acidogênicas. Na Acetogênese, terceira fase, os produtos produzidos na fase anterior são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Finalmente, a última fase, na Metanogênese; o metano e o CO₂ são produzidos sob as rigorosas condições anaeróbicas (Chozhavendhan *et al.*, 2023).

A DA é uma rota tradicional para a conversão de biomassa em biogás, material digerido (digestato), e energia renovável. O biogás consiste principalmente de CH₄ (50-75% do volume), CO₂ (25-50%) e gases traços (1-2%). A composição e quantidade dependem da eficiência do processo bioquímico, influenciada pela temperatura, pressão e pH. O biogás pode ser facilmente armazenado e distribuído para qualquer local. Também é uma boa fonte para produzir H₂ por meio do processo de reforma a vapor do gás metano, que pode ser usada também para produzir amônia (Andreides *et al.*, 2022; Emebu; Pecha; Janáčová, 2022; Sharma, 2019).

A DA da biomassa pode ser feita em materiais individuais (monodigestão) ou misturas de numerosos materiais orgânicos (digestão mista ou codigestão). A codigestão melhora a bioconversão de resíduos e a geração de energia, aumentando a disponibilidade de nutrientes para micróbios e carga orgânica, reduzindo a toxicidade química inibitória através da diluição do co-substrato (Kunatsa; Xia, 2022).

No trabalho de Oduor *et al.* (2022) , a codigestão aumentou a produção de biogás em comparação com a monodigestão. A codigestão do Jacinto-de-água (HW), ou também chamado de Aguapé, com resíduos alimentares (FW) melhorou a produção de biogás em 5%, 9%, 15%, 53% e 58% para proporções de mistura de 85:15, 30:70, 15:85, 55:45 e 70:30 (WH: FW), respectivamente. Outro exemplo de codigestão foi introduzido por FAN *et al.* (2022), mostraram a codigestão anaeróbia de vinagre de madeira utilizando esgoto doméstico como inóculo, que

apresentou uma maior eficiência no processo, apontando que a domesticação contínua de substratos promoveu o enriquecimento de comunidades microbiológicas funcionais relacionadas.

2.5 HIDROGÊNIO

O hidrogênio é um elemento químico simples, incolor e inodoro, o átomo é composto de um único elétron orbitando em torno de um único próton. Tem uma densidade menor que o ar e, por ter baixo peso molecular e baixa viscosidade, é muito suscetível a vazamentos. A taxa de vazamento é 50 vezes maior que a da água e 10 vezes maior que a do nitrogênio líquido. O poder energético do hidrogênio é sete vezes maior do que o dos combustíveis fósseis. Estima-se que 1 kg de hidrogênio tenha uma energia de armazenamento de mais de 2,75 kg de gasolina, ou 1 L de hidrogênio tenha a mesma energia que 0,25 L de gasolina (Agyekum *et al.*, 2022; Hajji *et al.*, 2022). Quando comparado com outros energéticos, o hidrogênio apresenta maior potência energética como mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Comparação do potencial energético de diferentes combustíveis com o vetor energético hidrogênio.

Combustível	(MJ/kg)
Hidrogenio	120
Gás liquefeito de petróleo - GLP	54.4
Propano	49.6
Gasolina de aviação	46.8
Gasolina de automoveis	46.4
Diesel automobilistico	45.6
Etanol	29.6
Mettanol	19.7
Lenha	16.2
Bagaço de Cana	9.6

Fonte: Yaqub Qazi (2022).

Quando produzido por rotas de produção de baixo e zero carbono, armazenado e, posteriormente, usado em dispositivos de conversão de energia de emissão zero, como células a combustível, o hidrogênio pode ser usado como fonte de combustível. Tem grande flexibilidade como transportador de energia e pode ser usado como combustível para transporte rodoviário e ferroviário pesado, navios e aeronaves. Assim como pode ser usado em processos industriais e

como vetor de energia em residências para cocção e aquecer (Mukelabai; Wijayantha; Blanchard, 2022).

As residências também podem ser alimentadas localmente, empregando células a combustível. O Hidrogênio também pode ser queimado para produzir calor (energia térmica) para aquecimento de ambientes e água quente (Ishaq; Dincer; Crawford, 2022).

Existem diferentes rotas para a produção de hidrogênio. Segundo Gregorie *et al.* (2020) o hidrogênio pode ser produzido convencionalmente, a partir de combustíveis fósseis através da reforma ou pirólise de hidrocarbonetos, ou por vários processos de conversão através de fontes renováveis. Quando o H₂ é produzido a partir de gás natural (GN) e outros combustíveis fósseis, sendo o resultado e subproduto de processos industriais, acompanhado de emissão de CO₂ é chamado de *Gray hydrogen*. Com a modificação do processo de produção permitindo o sequestro e armazenamento de CO₂ (SAC) e, ao mesmo tempo, evitando a poluição, o hidrogênio cinza é muitas vezes chamado de *blue hydrogen*. O *Green hydrogen* é produzido através da eletrólise da água usando eletricidade de fontes renováveis, como energia hidrelétrica, eólica, solar fotovoltaica (PV) ou biomassa (Bauer *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2022).

O hidrogênio em todo o mundo é produzido por rotas de conversão já edificadas em que não capturam o CO₂ liberado. No entanto, para alcançar um desenvolvimento sustentável, a produção de hidrogênio deve se reduzir cada vez mais a emissão de carbono. Custos mais baixos para produzir H₂ de baixo carbono aumentarão o potencial de hidrogênio. Ou seja, se os custos da energia solar e eólica se tornarem mais baratos, a energia primária será uma mistura de fontes renováveis (Von Zuben *et al.*, 2022).

3 **ARTIGO 1: BIOENERGIA ANIMAL - EVOLUÇÃO E POTENCIAL DISPONÍVEL NO ESTADO DA PARAÍBA**

RESUMO

A bioenergia, forma de energia renovável, consiste na combustão direta de matéria orgânica, advinda da agropecuária, de resíduos sólidos urbanos, do setor florestal e industrial e efluentes. Também se dá pela conversão de combustíveis como o biogás por meio da digestão anaeróbia. O biogás geralmente é usado para alimentar geradores para produzir eletricidade. Esse trabalho buscou analisar o potencial energético do biogás de esterco animal disponível entre 2000 e 2020 no Estado da Paraíba. Para isso, foi estimado a produção de biogás, o potencial técnico gerador de eletricidade (PTG) e a equivalência energética com o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Os resultados mostraram que o efetivo do rebanho galináceo é o maior durante todo o período analisado, no entanto participa com 12% do PTG e o rebanho bovino é o que tem mais relevância na participação no potencial energético e consequentemente no PTG, com cerca de 75%. Estima-se que a Paraíba possui um PTG médio anual de 1,90 TWh. Além disso, foi possível projetar para o ano de 2020, que o potencial de energia elétrica proveniente do biogás de esterco animal poderia abastecer todo o setor residencial do Estado, o que equivale a 5,73 mil toneladas de GLP.

Palavras-chave: Bioenergia; Biogás; Potencial de geração elétrica;

ARTICLE 1: EVOLUTION OF POTENTIAL ANIMAL BIOENERGY AVAILABLE IN PARAÍBA STATE

ABSTRACT

Bioenergy, a form of renewable energy, consists of the direct combustion of organic matter, coming from agriculture, urban solid waste, forestry and industrial waste, and effluents. It also occurs through the conversion of fuels such as biogas and biodiesel through anaerobic digestion. Biogas is used for food generators to produce electricity. This work sought to analyze the energy potential of animal manure biogas available between 2000 and 2020 in the State of Paraíba. To this end, the production of biogas, the technical potential for generating electricity (PTG) and the energy equivalence with Liquefied Petroleum Gas (LPG) were estimated. The results showed that the efficiency of the chicken herd is the highest throughout the analyzed period,

however it participates with 12% of the PTG and the cattle herd is the one that has the most relevance in terms of participation in the energy potential and consequently in the PTG, with around 75 %. It is estimated that Paraíba has an average annual PTG of 1.90 TWh. Furthermore, it was possible to project for the year 2020 that the electrical energy potential from animal manure biogas could supply the entire residential sector of the State, which is equivalent to 5.73 thousand tons of LPG.

Keywords: Bioenergy; Biogas; Potential for generating electricity.

3.1 INTRODUÇÃO

A rivalidade por combustíveis fósseis, como petróleo, gás e por recursos não-renováveis como minerais críticos favorecem crises geopolíticas, o que aumenta a insegurança energética no globo. A dependência de fontes não renováveis além de prejudicial economicamente, agrava o aquecimento global e a degradação ambiental. A urbanização desordenada e o aumento populacional são fatores que favorecem a predação dos recursos naturais, cada vez mais escassos, bem como implica no aumento das emissões globais de CO₂. Estima-se que em 2030 a emissão global será de 65 Gt (Agonafer; Eremed; Adem, 2022; International Energy Agency, 2021).

O debate energético para atingir a liquidez do carbono, é cada vez mais urgente na comunidade internacional. O Acordo de Paris estabeleceu metas para mitigar as mudanças climáticas ao limitar o aumento da temperatura global para menos de 2 °C, ou de forma mais ambiciosa, em 1,5 °C até o final deste século (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, 2015)

Para responder ao crescimento da demanda energética e reduzir os efeitos das emissões se faz necessário desenvolver tecnologias para uma oferta diversificada de energia sustentável. As energias renováveis, são abastecidas com recursos naturais que não diminuem com o tempo, isso inclui a energia solar, hidroelétrica, geotérmica e bioenergia (Agonafer; Eremed; Adem, 2022; Majeed; Luni; Tahir, 2022).

As fontes de energias renováveis tiveram em 2019 uma participação de 14% no suprimento de energia primária no mundo. Para cumprir o itinerário do Acordo de Paris, a parcela de eletricidade direta no consumo total de energia final deve aumentar de 21% em 2019 para mais de 50% em 2050. E ainda, a parcela de energia renovável no consumo total de energia final aumentaria de 19% em 2019 para 79%. A parcela de renováveis na geração de eletricidade

aumentaria de 26% em 2019 para 90% em 2050 (International Energy Agency, 2021; World Bioenergy Association - WBA, 2021).

Segundo o Balanço Energético Nacional no Relatório Síntese 2024, a matriz energética brasileira teve participação de energias renováveis (ER) de 49,1% em 2023. O mundo em 2021 teve uma participação de 14,7% em ER. A participação na Matriz elétrica do Brasil foi de 89,2% em 2023, enquanto no mundo foi de 28,7 em 2021. A energia da biomassa ou bioenergia refere-se ao uso de biomassa, ou seja, commodities biológicas, para a obtenção de energia pode ser entendida como resíduos, sejam resíduos sólidos urbanos, resíduos animais, do processamento de alimentos ou até plantas aquáticas, incluindo algas (Archer, Sophie A.; Steinberger-Wilckens, 2018; World Bioenergy Association - WBA, 2021).

Por meio da digestão anaeróbia (DA) se realiza a recuperação energética e tratamento dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes. A digestão anaeróbia é amplamente utilizada para tratamento de materiais lignocelulósicos, esterco animal, resíduos de cozinha e lodo de esgoto. Várias tecnologias podem ser adotadas como o reator anaeróbio de tanque completamente agitado (CSTR), reator anaeróbico de manta de lodo (UASB), reator anaeróbio de leito fluidizado (AFB) e filtros anaeróbicos de fluxo ascendente (UFA) (Amin *et al.*, 2017a; Thiruselvi *et al.*, 2021a).

O biogás contém cerca de 50–75% de metano (CH_4), 25–45% de CO_2 , de 2–8% vapor d'água e traços de O_2 , N_2 , NH_3 , H_2 , e sulfeto de Hidrogênio (H_2S). Suas características dependem da matéria orgânica utilizada, do design tecnológico, da temperatura de fermentação e do tempo de retenção. O biogás é geralmente utilizado como combustível para máquinas alimentando geradores para produzir eletricidade (Aravani *et al.*, 2022; Majeed; Luni; Tahir, 2022)

Em seu trabalho, Sena, Papa e Sobral (2022) avaliaram o potencial de aproveitamento energético em uma granja de 1170 suínos, que pode converter a biomassa em energia e gerar cerca de 9041,1 kWh a cada mês. Na pesquisa feita por Ferreira, Gomes, Arruda e Sales (2021) estimaram a produção de biogás por meio dos principais dejetos da pecuária para geração de eletricidade no Brasil. Uma avaliação de potencial energético dos resíduos da pecuária e agricultura foi feita por Coelho (2018), que identificou os energéticos de biomassa, biogás, e eletricidade e estimou seu potencial a partir de dados da literatura.

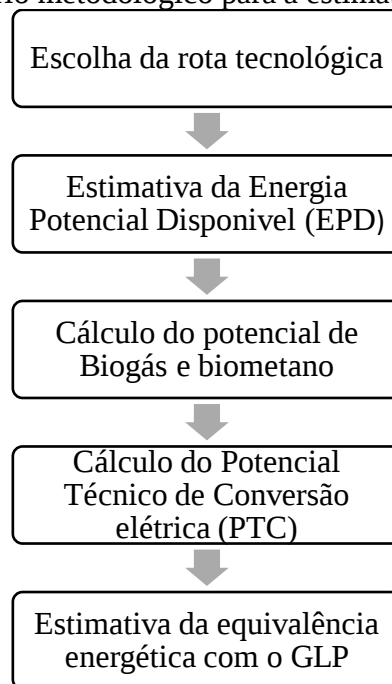
Esse trabalho apresenta uma análise da evolução da oferta potencial de energia no Estado da Paraíba a partir da digestão anaeróbia dos dejetos animais da pecuária e estima o potencial técnico gerador de eletricidade disponível para recuperação energética, visando

fornecer informações que incentivem os setores da pesquisa e desenvolvimento para aproveitamento da bioenergia na Paraíba.

3.2 METODOLOGIA

As informações do número de animais arrebanhados entre os anos 2000 e 2020 no Estado da Paraíba, foram obtidos a partir do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE por meio do Sistema de Recuperação automática – SIDRA. Os dados analisados são dos rebanhos bovino, galináceo, caprino, ovino, suíno e equino. Para mensurar o equivalente energético potencial da pecuária foi estabelecido o seguinte caminho, conforme apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Itinerário metodológico para a estimativa de Energia Potencial.



Fonte: O Autor (2022).

A rota tecnológica escolhida para o aproveitamento dos resíduos da pecuária foi a digestão anaeróbia (DA). Na qual possibilita o tratamento dos resíduos e sua possível comercialização além da produção de biogás (Thiruselvi *et al.*, 2021b).

A Energia Potencial Disponível (EPD) na pecuária paraibana foi estimada a partir da Equação 1:

$$EPD = PCI \cdot C \cdot f \cdot t \quad (1)$$

Onde, EPD é a Energia Potencial Disponível por unidade animal a cada período; t é o período de dias analisados (365 dias); C é a carga de dejetos produzidas por unidade animal; PCI é o Poder Calorífico Inferior segundo a parcela de CH₄; e f é o fator de conversão de quilocaloria para outra unidade (4,1868 kcal para kJ). As cargas diárias de dejetos animais retirados de diversas fontes foram adotadas de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Carga diária de dejetos por rebanho.

Substrato animal	Carga de dejetos (kg)	Biogás potencial (m ³ /kg)
Galináceo	0.18	0.285
Bovino	10	0.27
Caprino	0.5	0.061
Equino	10	0.26
Ovino	0.8	0.25
Suíno	2.5	0.56

Fonte: Adaptado de Quadros *et al.* (2010); Colatto, Langer (2012); Embrapa (2022).

Para uma produção de biogás com 60% de metano foi considerado o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás de 5136,46 kcal/Nm³, como apresentado por Avellar (2001). Desse modo, foi possível realizar a conversão para Joule (J) e para quilowatt-hora (kWh), de acordo com os fatores de conversão da EPE (2017), obtendo 21505,33 kJ e 5,67 kWh para cada Nm³ de biogás. A EPD unitária estimada foi estabelecida na forma de coeficientes conforme apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Coeficientes de Energia Potencial Disponível (EPD) por animal ao ano.

Unidade animal	GJ	MWh	KW
Galináceo	0.403	0.11	4.66
Bovino	21.194	5.89	245.30
Caprino	0.239	0.07	2.77
Equino	20.409	5.67	236.21
Ovino	1.570	0.44	18.17
Suíno	9.890	2.75	114.47

Fonte: Os autores (2022).

Para se aproximar do quadro mais real, devido o comportamento dos animais do rebanho bovino, foi considerado um aproveitamento de 25% da EPD para os rebanhos bovinos com finalidade na produção de leite e de 100% para os rebanhos bovinos com finalidade de corte ou terminação. O cálculo para a EPD bovina é dado pela Equação 2.

$$EPD_{bovino} = PCI \cdot C \cdot f \cdot t \cdot Fm \quad (2)$$

F_m representa o fator de manejo, o qual é dado segundo a Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Fator de manejo para a finalidade do rebanho bovino.

Tipo de Bovino	Fator de manejo.
Bovino de Leite	0.25
Bovino de Corte	1.0

Fonte: EPE (2020).

A especificação, quanto a finalidade do rebanho, se justifica pela grande relevância da EPD bovina no cenário paraibano, sendo necessária uma ponderação para que não ocorra uma superestimativa da EPD. Foram adotados os coeficientes utilizados na metodologia da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, em nota técnica 03/2020, para o ponderar a EPD bovina conforme finalidade.

O número de bovinos por finalidade foi obtido por meio dos dados do Censo Agropecuário 2017. Após a estimativa da EPD por rebanho prosseguiu-se para a estimativa de potencial técnico de geração elétrica (PTG) por meio da Equação 3. Adotou-se, para efeito de cálculo, a tecnologia do Reator Contínuo de Tanque Agitado (CSTR).

$$PTG = EPD \cdot F_t \cdot \eta_{MG} \quad (3)$$

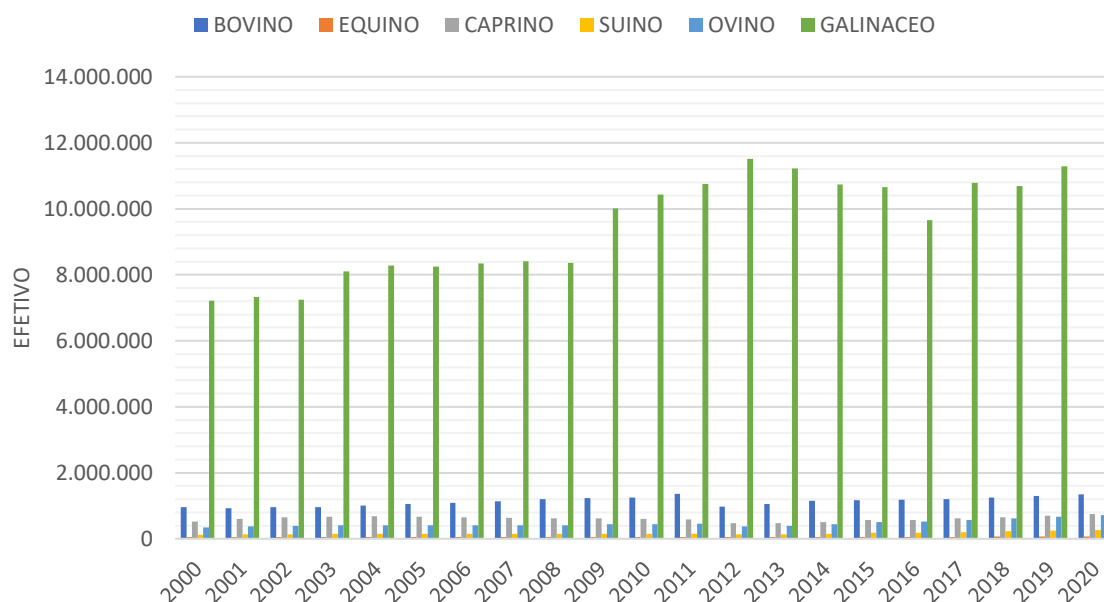
Em que F_t representa o Fator tecnológico utilizado, neste trabalho, para CSTR de 0,8 (EPE, 2020). O rendimento da conversão do conjunto motor-gerador é representado pelo η_{MG} , aqui adotado de 0,26 (Rossetto *et al.*, 2014).

A estimativa da equivalência energética se deu pela tabela de mesma referência apresentada no trabalho de Pompermayer e Paula Junior (2000). Ademais, adotou-se que 1 m³ de biogás equivale a 1,43 kg de Gás liquefeito de Petróleo (GLP), de acordo com a equivalência de (Nogueira, 1986).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados coletados foi possível observar uma tendência de crescimento no efetivo dos rebanhos animais no Estado, conforme pode ser observado na Figura 3.2, de modo que o rebanho galináceo compõe o maior efetivo em número de animais, incluindo todas as finalidades.

Figura 3.2 - Evolução do efetivo dos rebanhos na Paraíba.



Fonte: adaptado do IBGE (2022).

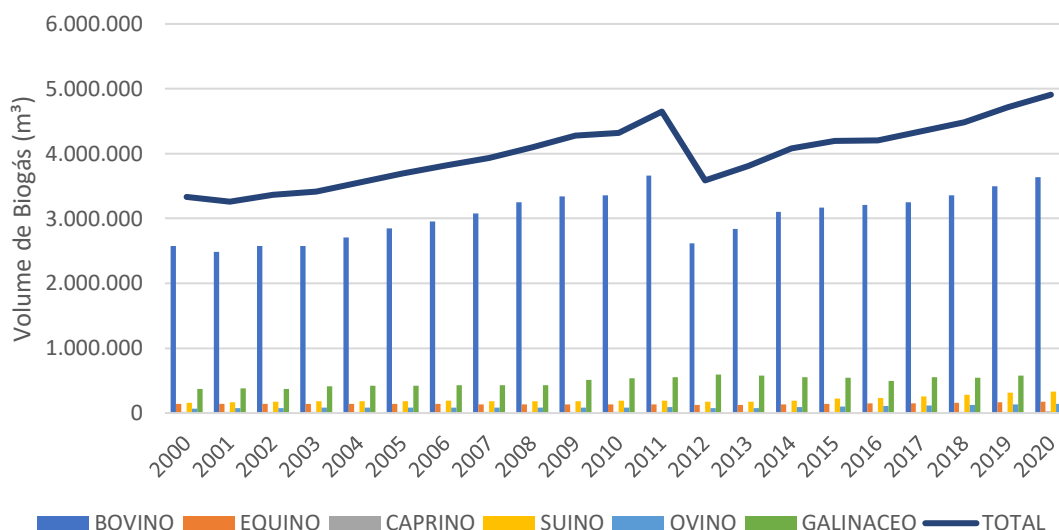
No ano 2000 o efetivo galináceo era de 7,21 milhões, a partir de 2003 houve um crescimento, superando os 8 milhões. A partir de 2009 o efetivo galináceo se manteve acima dos 10 milhões, com um pico em 2012 de 11,5 milhões. Desde o ano seguinte, houve um decréscimo até o ano de 2016, registrando 9,6 milhões de animais. No ano de 2020 houve o maior registro do efetivo galináceo, 11,85 milhões.

O rebanho bovino é o segundo maior, registrando em 2000 um efetivo de 954,77 mil. O efetivo bovino cresceu até 2011, chegando em seu maior número durante o período analisado, 1,35 milhões de cabeças. No ano de 2012, o efetivo foi de 969 mil cabeças, uma queda de 28,5% em relação anterior. A queda no número de animais, entre os anos de 2011 e 2012 se justifica pela estiagem, que segundo Leivas *et al.* (2014), advinda pela transição para o evento climático El Niño. Desde o ano de 2013 o rebanho bovino registra um crescimento ano após ano. Em 2020, registrou-se 1,34 milhões de cabeças de gado na Paraíba.

Pode-se depreender que há um grande potencial bioeconômico para empreendimentos de bioenergia quando se observa um crescente aumento do número de animais em cada rebanho.

O efetivo galináceo possui um número de indivíduos bem maior que os outros animais, mas não representa uma quantidade proporcional de EPD, isso se justifica pelo porte do animal e pela carga de dejetos disponível para a possível recuperação energética, tal qual como os valores de produção de biogás por animal apresentados na Tabela 3.1. Na Figura 3.3, é possível visualizar o montante de biogás estimado para cada rebanho.

Figura 3.3 - Evolução da Bioenergia animal potencial disponível na Paraíba.



Fonte: Os autores (2022).

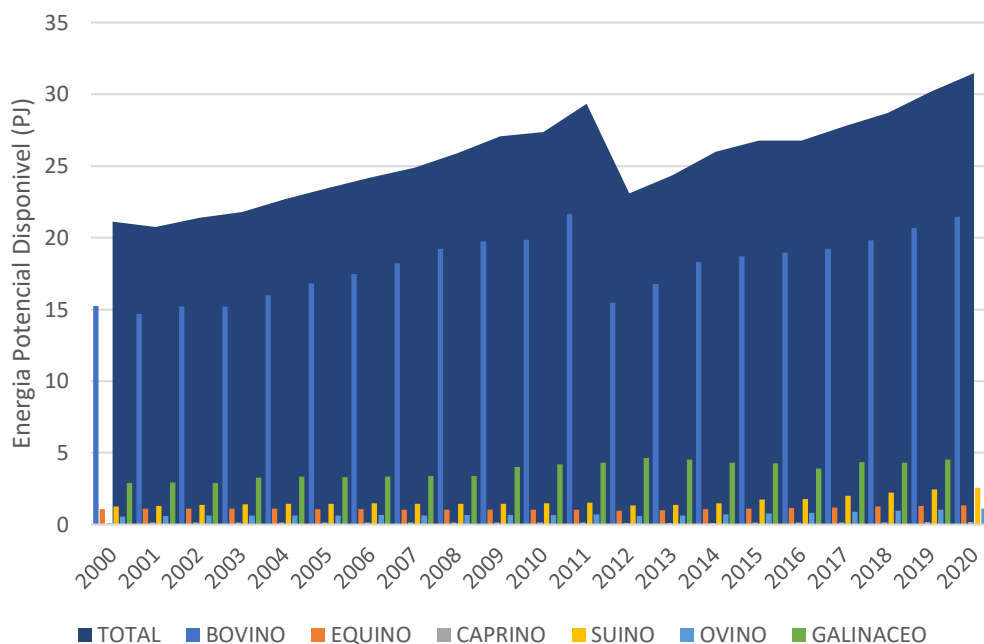
O volume de biogás estimado, apresentado na Figura 3.3, considera a conversão completa da matéria orgânica excretada pelos rebanhos, diferentemente da EPD que apresenta um cenário de perdas ao considerar apenas a carga tecnologicamente recuperável nos estabelecimentos.

Durante o ano de 2011 registrou-se o maior número de bovinos, produzindo 2,75 milhões m³ de Biogás, sendo o volume total estimado em 3,74 milhões de m³. No ano de 2020 foi obtido o maior volume de Biogás, cerca de 6,7%, quando comparado com o ano de 2011. Mesmo com o efetivo bovino menor que em 2011, o volume foi maior pelo crescimento dos outros rebanhos de menor participação.

A Figura 3.4 apresenta a EPD na Paraíba para cada rebanho ao longo dos anos analisados. Ao analisar a EPD ao longo dos anos notou-se uma tendência crescente desde o ano de 2000 até 2011. Em 2012 há uma queda abrupta no índice de EPD, a qual acompanha o efetivo de animais e o volume de biogás estimado. Segundo Duarte *et al.* (2018a), nos anos de 1998 a 2000 e de 2012 a 2014 houve o agravamento das secas no Brasil, o que impactou severamente na agropecuária, o que não foi diferente no Estado da Paraíba.

Os anos de 2011 e 2012 foram de maior severidade, e quando se analisa o registro do ano de 2012, observa-se a queda em comparação com o ano anterior. A partir daí revelando uma relação clima-agropecuária.

Figura 3.4 - Evolução da EPD na Paraíba a partir dos dejetos animais.

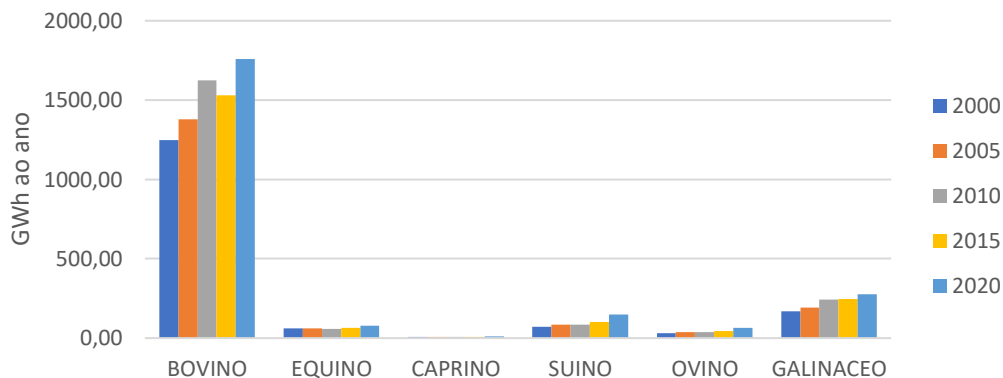


Fonte: Os autores (2022).

A maior população bovina foi registrada em 2011, consequentemente, o ano possui a maior EPD do rebanho bovino no período observado, 21,6 PJ. Para o ano de 2020, foi estimado uma EPD de 21,4 PJ. Durante os anos analisados, o rebanho galináceo não ultrapassou 5 PJ. Na primeira década, a média estimada de EPD do rebanho galináceo foi de 3,28 PJ. Durante a segunda década a média da EPD do rebanho galináceo foi maior que na década anterior, 4,34 PJ. O período mais agudo das secas, 2011 e 2012, não afetou o crescimento do efetivo galináceo, assim, representando um aumento na EPD do rebanho no ano de 2012, movimento contrário aos outros rebanhos. Os rebanhos caprinos e equinos se mantiveram sem alterações relevantes durante o período, com médias de EPD para caprinos de 0,15 PJ e equinos de 1,10 PJ.

A Figura 3.5 mostra o PTG calculado considerando as perdas na eficiência da conversão energética do combustível em eletricidade. Como pode ser observado, durante os anos de 2000 a 2020 o estado da Paraíba poderia fornecer em média 1,90 TWh a cada ano.

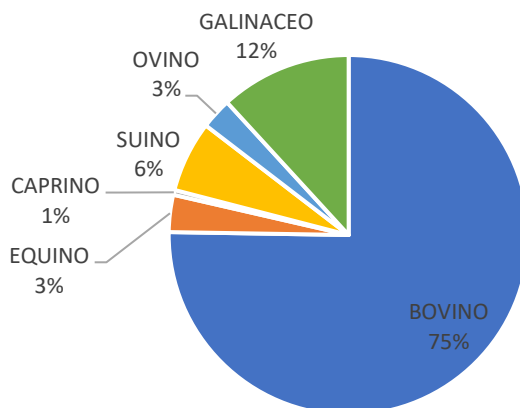
Figura 3.5 - Potencial técnico de geração de eletricidade na Paraíba através de dejetos de diferentes tipos de animais.



Fonte: Os autores (2022).

O Rebanho caprino possui a menor quantidade de potencial teórico de geração de eletricidade. No ano 2000 obteve-se um PTG de 7310,38 kW/ano, enquanto o rebanho bovino e galináceo performaram PTG com cerca 142,35 kW/ano e 19,16 kW/ano. O rebanho caprino continuou com um PTG em crescimento até o ano de 2011, tendo um PTG de 0,92 kW/ano. No ano de 2012 houve uma queda do PTG na maioria dos rebanhos com exceção do galináceo, que marcou 30,57 kW/ano. No ano de 2020, um o PTG bovino foi de 200,70 kW; para o rebanho galináceo, 31,49 kW; para o rebanho suíno, 17,02 kW; para os rebanhos ovino e equino estimou-se um PTG de 7,39 e 8,88 kW. As projeções mostraram que o ano 2000 teria um PTG total de 1,55 TWh, o menor entre os analisados. O maior PTG total projetado foi para o ano de 2020 com 2,34 TWh. A participação do rebanho bovino é de longe a mais significativa, conforme mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Participação dos rebanhos na PTG paraibana em 2020.



Fonte: Os autores (2022).

A alta participação do grupo bovino é em decorrência da alta carga de dejetos a serem potencialmente recuperáveis. O rebanho galináceo, o maior em unidades animais, consegue ofertar apenas a segunda maior parte, devido ao porte pequeno do animal e constituição química dos dejetos. A partir das relações energéticas de equivalência foi obtido o seguinte quadro, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Potencial técnico de Conversão de energia e equivalências energéticas em 2020.

Tipo de Rebanho	Volume de Biogás (Mil m³Biogás)	EPD (PJ)	PTG (GWh)	GLP eq. (t)
Bovino	2735	21.47	1758.17	3911
Equino	172	1.35	77.87	246
Caprino	23	0.18	10.26	32
Suíno	329	2.58	149.13	470
Ovino	143	1.12	64.82	204
Galináceo	608	4.77	275.88	870
Total	4009	31.47	2336	5733

Fonte: Os autores (2022).

O potencial de conversão da bioenergia na Paraíba tem capacidade estimada para abastecer todo o setor residencial no Estado. Ao considerar as informações do painel de monitoramento de consumo de energia elétrica da EPE, o consumo médio anual do setor residencial foi de 2,19 TWh, inferior ao PTG estimado para 2020 de 2,34 TWh (266,68 kW). Segundo Ferreira *et al.*, (2021) a bioenergia animal poderia ser convertida e gerar cerca de 36,3 TWh/ano, ao considerar a biomassa dos resíduos bovinos, aves, equinos e suínos no Brasil. Os apontamentos deste trabalho introduziram os rebanhos ovinos e caprinos nas estimativas, mesmo com menor participação, somam 4% do PTG na Paraíba.

Assim, o PTG da bioenergia animal na Paraíba significa 6,44% do PTG brasileiro. A equivalência energética do biogás estimado com o GLP é de 5733 toneladas, o que significa 441 milhões de botijões de GLP de 13 kg, utilizado nos domicílios residenciais, o que poderia abastecer 37 milhões de domicílios mensalmente.

3.4 CONCLUSÃO

Verificou-se que o crescimento da pecuária no estado da Paraíba entre os anos de 2000 e 2020, traduz um terreno para a oportunidades em bioenergia a partir da pecuária, por meio de rotas como da digestão anaeróbia. O comportamento das curvas de geração de biogás e energia potencial disponível (EPD) ao longo do tempo mostrou uma tendência de evolução, com um

recuo no ano de 2012, devido ao agravamento das secas no Brasil. Os cálculos teóricos indicaram um potencial técnico gerador de eletricidade (PTG) médio anual de 1,90 TWh para o estado da Paraíba.

O potencial de energia elétrica encontrado proveniente do biogás de dejetos animais para o ano de 2020 poderia abastecer todo o setor residencial do estado, cerca de 2,34 TWh, e que se convertido equivale a 5,73 mil toneladas de GLP. A magnitude de recuperação energética é alta, onde em termos de grandeza consegue oferecer segurança de energia elétrica para todo o setor residencial do Estado.

Os rebanhos bovinos têm a maior participação estimada na bioenergia animal, cerca de 75%, quando comparada aos outros rebanhos. Por fim, os números apontam que com a devida infraestrutura e logística, a bioenergia animal na Paraíba poderia atender 37 milhões de domicílios com botijões de GLP de 13 kg para o uso em cocção, o que reduziria custos de produção, impactos ambientais e emissão de gases de efeito.

3.5 REFERÊNCIAS

- Agonafer, T. D., Eremed, W. B., & Adem, K. D. (2022). Biogas-based trigeneration system: A review. In *Results in Engineering* (Vol. 15). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100509>
- Amin, F. R., Khalid, H., Zhang, H., Rahman, S., Zhang, R., Liu, G., & Chen, C. (2017). Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>
- Aravani, V. P., Sun, H., Yang, Z., Liu, G., Wang, W., Anagnostopoulos, G., Syriopoulos, G., Archer, S. A., & Steinberger-Wilckens, R. (2018). Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23178–23192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.161>
- Duarte, J. G. P., Farias, A. A. de, Sousa, F. de A. S. de, Souza, J. T. A., & Ramos, M. M. Q. (2018). Secas e Impactos na Agropecuária no Município de Campina Grande - PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(2), 289–297. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332008>
- Ferreira, B., Gomes, A., Arruda, M., & Santos, A. (2021). *ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DEJETOS DE ANIMAIS DA PECUÁRIA NO BRASIL* (pp. 298–316). <https://doi.org/10.31692/978-65-88970-19-5.298-316>
- International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. www.iea.org/t&c/
- Leivas, J. F., Guimarães Andrade, R., De Castro Victoria, D., Torresan, F. E., & Bolfe, L. (2014). *REVENG Engenharia na agricultura, viçosa-mg*.
- Majeed, M. T., Luni, T., & Tahir, T. (2022). Growing green through biomass energy consumption: the role of natural resource and globalization in a world economy. *Environmental*

Science and Pollution Research, 29(22), 33657–33673. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18017-w>

Nogueira, L. A. H. (1986). *Biodigestão a Alternativa Energética*. Editora Nobel.

POMPERMAYER, R. de S., & PAULA JUNIOR, D. R. de. (2000). Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. *Proceedings of the 3. Encontro de Energia No Meio Rural*.

Rossetto, C., & others. (2014). *Desempenho de motor-gerador de Ciclo Otto operado com gasolina e biogás proveniente de suinocultura e de uma estação de tratamento de esgotos*.

Thiruselvi, D., Kumar, P. S., Kumar, M. A., Lay, C.-H., Aathika, S., Mani, Y., Jagadiswary, D., Dhanasekaran, A., Shanmugam, P., Sivanesan, S., & Show, P.-L. (2021a). A critical review on global trends in biogas scenario with its up-gradation techniques for fuel cell and future perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(31), 16734–16750. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.023>

World Bioenergy Association - WBA. (2021). *GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2021*.

4 ARTIGO 2: ANÁLISE DE INDICADORES DE LOCALIZAÇÃO E ESPECIALIZAÇÃO DO POTENCIAL BIOENERGÉTICO ANIMAL NA PARAÍBA

RESUMO

O biogás, um recurso energético renovável, é produzido pela decomposição da matéria orgânica, como dejetos animais, resíduos agrícolas, lodos de efluentes e resíduos alimentares em condições anaeróbias. Este estudo analisou o padrão de localização e especialização do potencial energético dos resíduos pecuários nos municípios, nas regiões imediata e intermediária do Estado da Paraíba (Brasil) no período de 2000 a 2020. O potencial energético foi estimado a partir dos resíduos pecuários adquiridos dos rebanhos e do desenvolvimento de coeficientes de conversão com base em dados da literatura especializada. Os indicadores de especialização e localização calculados foram o Quociente Locacional (QL) e os índices de Krugman (SI), Hoover (H) e Ellison-Glaeser (EG). Os resultados mostraram que o Estado da Paraíba pode produzir em média cerca de 31,3 PJ de bioenergia animal por ano. A região imediata de Campina Grande possui a maior média anual de energia, com cerca de 7,38 PJ. Na região de Sumé e Monteiro houve uma concentração de energia potencial teórica (PTE) de caprinos e ovinos. Por meio do SI, observou-se uma dissimilaridade semelhante entre os municípios do entorno formando núcleos. Tal configuração pode indicar um potencial bioenergético para possíveis investimentos a serem estudados.

Palavras-chave: Biomassa; Economia de energia; Energia renovável

ARTICLE 2: ANALYSIS OF INDICATORS OF LOCATION AND SPECIALIZATION OF ANIMAL BIOENERGETIC POTENTIAL IN PARAÍBA (BRAZIL).

ABSTRACT

Biogas, a renewable energy resource, is produced by the decomposition of organic materials such as manure, agricultural waste, sewage sludge and food waste under anaerobic conditions. This study analyzed the pattern of location and specialization of the energy potential of livestock waste in the municipalities, in the immediate and intermediate regions of the Paraíba state (Brazil) from 2000 to 2020. The energy potential was estimated from the livestock residues

acquired from the herds and the development of conversion coefficients based on data from the specialized literature. The indicators of specialization and location calculated were the Locational Quotient (LQ), and the indexes of Krugman (SI), Hoover (H) and Ellison-Glaeser (EG). The results showed that the Paraíba state can produce on average about 31,3 PJ of animal bioenergy each year. The immediate region of Campina Grande has the highest average annual energy, with around 7,38 PJ. In the region of Sumé and Monteiro was concentration of theoretical potential energy (TEP) of goat and sheep. Through the SI, a similar dissimilarity was observed between surrounding municipalities forming nuclei. Such a configuration may indicate a bioenergetic potential for investments to be studied.

Keywords: Biomass; Energy economy; Renewable energy

4.1 INTRODUÇÃO

O cenário energético global é constantemente afetado por crises geopolíticas em torno do petróleo, gás e da busca por recursos e materiais escassos. A insegurança é agravada pelo atual modelo de desenvolvimento urbano, centrado em uma busca incessante por materiais como aço e cimento e no uso intensivo de energia. Também afetado pelo crescimento populacional global, estimado em cerca de 25% nos próximos 30 anos até 2050, isso resultaria em 9,7 bilhões de pessoas em todo o mundo. Outro fator são as mudanças climáticas e a participação dos conglomerados urbanos em mais de 70% nas emissões globais de CO₂ (International Energy Agency, 2021).

O Acordo de Paris estabeleceu metas para mitigar as mudanças climáticas, limitando o aumento da temperatura global a menos de 2 °C, ou mais ambiciosamente, em 1,5 °C até o final deste século (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, 2015).

Para que o mundo continue com o objetivo de evitar que o aquecimento global exceda 1,5 °C ou mesmo 2 °C, espera-se que a participação da eletricidade direta no consumo total de energia final aumente de 21% em 2019 para mais de 50% em 2050. Na estimativa, a participação das energias renováveis no consumo final total de energia aumentaria de 19% em 2019 para 79% em 20250, e a participação das energias renováveis na produção de eletricidade aumentaria de 26% em 2019 para 90% em 2050 (Internacional Renewable Energy Agency - IRENA, 2022).

O aumento do uso da bioenergia é um dos caminhos para o cenário de crescimento energético e cumprimento das metas globais. A bioenergia é uma alternativa aos combustíveis fósseis, principalmente para reduzir as emissões de CO na atmosfera, permitindo a segurança energética (Nogueira; Capaz; Lora, 2021).

Em 2019, 655 TWh de eletricidade foram gerados a partir de biomassa em todo o mundo, 13% dos quais foram através de biogás. O Brasil em 2021 apresentou um crescimento de 20,9% em relação a 2020 na oferta doméstica de energia por meio do biogás. O potencial de geração de energia no Brasil a partir do biogás foi de 241,65 MW, com a participação do Estado da Paraíba de 5,7 MW. Em nível nacional, o potencial de geração de energia a partir de resíduos pecuários foi de 2,02%, menor quando comparado à parcela concedida a partir de resíduos sólidos urbanos, com cerca de 82,71%, acompanhada de resíduos agroindustriais e florestais, com 13,18% e 2,06%, respectivamente (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2022; EPE, 2022; World Bioenergy Association - WBA, 2021).

O biogás, um recurso energético renovável, é produzido pela decomposição de materiais orgânicos, como dejetos animais, resíduos agrícolas, lamas de depuração e resíduos alimentares em condições anaeróbias (Yalcinkaya; Ruhbas, 2022). Tipicamente composto de 0-3% de sulfeto de hidrogênio (H_2S), 0-10% de gás nitrogênio (N_2), 0-1% de hidrogênio (H_2), 25-50% de dióxido de carbono (CO_2), 50-75% de metano (CH_4) e outros gases. A composição do biogás depende da natureza da matéria-prima a ser digerida a um pH médio (Aghel *et al.*, 2022).

A produção de biogás ocorre naturalmente na matéria orgânica em decomposição ou através da digestão anaeróbia, um processo biológico de baixo custo e economicamente viável. O material digerido resultante, um subproduto da digestão anaeróbia, pode ser usado como fertilizante. Os resíduos animais podem ser utilizados como matéria-prima para arranjos tecnológicos para a geração de bioenergia, sejam excretados de animais vivos e incluem esterco de leite, cama de aves de capoeira, resíduos e outros resíduos de operações pecuárias. (Ajay; Mohan; Dinesha, 2021; Caetano *et al.*, 2022).

Cerca de 60,4% dos municípios brasileiros são classificados como predominantemente rurais, onde aproximadamente 41% da produção do agronegócio brasileiro é gerada em pequenas propriedades rurais. O setor do agronegócio precisa de investimento e de um processo de governança para a segurança alimentar, a qualidade ambiental e a saúde humana. A produção pecuária brasileira em 2021 teve cerca de 1,5 bilhão de cabeças galináceas; 224,6 milhões de cabeças de gado e 42,5 milhões de suínos. Essa produção animal gera uma quantidade

significativa de resíduos, e os agricultores são responsáveis pelo tratamento dos resíduos animais. O uso de biodigestores para tratamento de resíduos mostra-se como uma alternativa, possibilitando a produção de energia elétrica como adicional no processo de tratamento (Guares; Lima; Oliveira, 2021; IBGE, 2017, 2022a).

Na região Nordeste, observa-se que 1/3 da população vive em municípios rurais. O Estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil, possui um território de 56.467,2 km², majoritariamente de áreas não urbanizadas, essas que somam 680,3 km² distribuídas em 223 municípios (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2023) O PIB da Paraíba em 2023 foi de 97,3 bilhões, dos quais cerca de 4% vêm do setor agropecuário (Banco do Nordeste do Brasil, 2024; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2022b). Em 2022, a produção animal no estado marcou 12,7 milhões de cabeças de galináceos: 1,37 milhão de cabeças de bovinos e 796,47 mil cabeças de caprinos (IBGE, 2017, 2022a, 2022b).

Os estudos de economia regional auxiliam na caracterização de setores produtivos e especializados em uma área, o que permite o desenvolvimento de estratégias para a promoção da economia. A análise da localização das atividades econômicas é de grande importância para o Estado, que visa a distribuição equilibrada das atividades, bem como para investidores e empresários, com a opção de localização visando a redução de custos e o aumento da competitividade das empresas (Alves, 2012; Mattei; Mattei, 2018).

Dentro do conjunto de métodos de análise regional estão as medidas de localização e especialização, onde a concentração espacial está relacionada à localização de uma indústria em todas as regiões. A especialização, por outro lado, refere-se à distribuição das indústrias em uma região e está inversamente relacionada ao grau de diversificação industrial na estrutura da economia local (Pérez Hernández; Lara Gómez; Hernández Calzada, 2022).

Os trabalhos de Coelho Junior *et al.* (2023) e de PEREIRA *et al.* (2022) utilizaram tais medidas, que são de natureza descritiva e aplicadas em estudos exploratórios, utilizando índices analíticos, discutidos na metodologia deste trabalho.

Com o objetivo de diversificar e descentralizar a composição do fornecimento de energia elétrica, bem como a identificação de locais propícios à bioenergia, este trabalho apresenta o padrão de localização e especialização do potencial energético dos resíduos pecuários nos municípios, nas regiões imediatas e intermediárias de acordo com a classificação do IBGE, (2017) no Estado da Paraíba.

Essa pesquisa colabora com o desenvolvimento científico da investigação espacial sobre bioeletricidade animal, sendo inovador na análise do tempo.

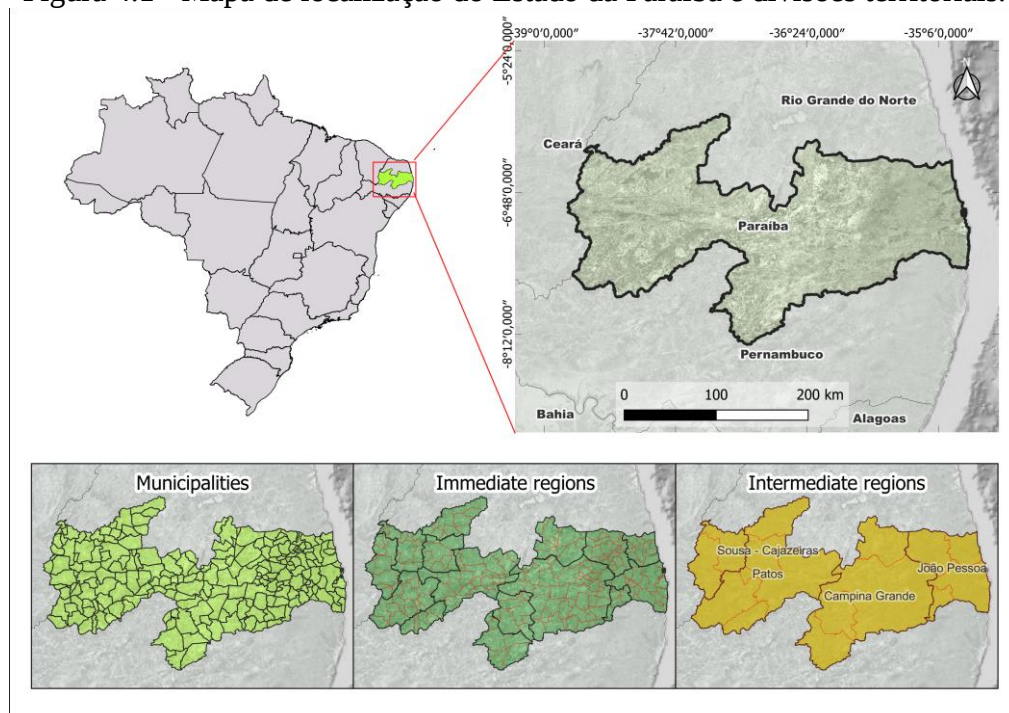
4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Área de estudo

As estratégias de produção de energia nativa e exploração econômica por meio da gestão de resíduos na pecuária necessitam de articulação (política, econômica e institucional) para a implantação de rotas bioeconômicas. O Estado da Paraíba foi escolhido como objeto de estudo devido o potencial bioenergético no setor agrícola ainda pouco estudado.

A área de estudo delimitada baseou-se na divisão territorial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que classifica o espaço estudado em municípios, regiões imediatas e regiões intermediárias do Estado da Paraíba, conforme mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1 - Mapa de localização do Estado da Paraíba e divisões territoriais.



Fonte: O autor (2022).

4.2.2 Análise de dados

Os dados foram obtidos da Plataforma do Sistema de Recuperação Automática - SIDRA, disponível no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, que compreende o número de rebanhos (pecuária) por município do Estado da Paraíba, no período de 2000 a 2020 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2022c).

Para mensurar o potencial energético teórico dos resíduos pecuários (aviários, bovinos, equinos, caprinos, ovinos e suínos) em cada área municipal, ou nas regiões geográficas imediata

e intermediária, foram desenvolvidos coeficientes para estimar a equivalência energética anual por unidade animal. Os coeficientes foram estimados com dados baseados na literatura, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Geração de resíduos e biogás por animal.

Animal	Resíduos gerados (kg/dia)	CH₄ gerado (m³/kg)
Aviário/Galináceo ¹	0.18	0.285
Bovino ¹	10	0.270
Caprino ²	0.5	0.061
Equino ¹	10	0.260
Ovino ³	0.8	0.250
Suíno ¹	2.25	0.560

¹ (Colatto; Langer, 2012);

²(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2022);

³(Quadros *et al.*, 2010).

A produção de biogás com 60% de metano foi admitida para o cálculo da energia potencial equivalente. O Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás foi de 5136,46 kcal/nm³(Avellar, 2001). Assim, foi possível realizar a conversão para Joule (J) e para quilowatts-hora (kWh), obtendo-se 21505,33 kJ e 5,67 kWh para cada Nm³ de Biogás. Os coeficientes foram obtidos por meio da Equação (4.1):

$$EPT = PCI \times L \times f \times t \quad (4.1)$$

Onde *EPT* é a Energia Potencial Teórica por unidade animal em cada período; *t* é o período de dias analisados (365 dias); *L* é a carga de resíduos produzidos por unidade animal; PCI é o Poder Calorífico Inferior de acordo com a porção de CH₄; e *f* é o fator de conversão de quilocalorias para outra unidade. Os coeficientes desenvolvidos e utilizados neste trabalho estão na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Coeficientes energéticos potenciais por unidade animal e por ano.

Unidade Animal	EPT (GJ)	EPT(MWh)
Aviário/Galináceo	0.403	0.11
Bovino	21.194	5.89

Caprino	0.239	0.07
Equino	20.409	5.67
Ovino	1.570	0.44
Suíno	9.890	2.75

Fonte: Os autores (2022).

Por fim, multiplicando o EPT de cada tipo de rebanho pelas unidades animais que o compõem em cada local (município, região geográfica imediata e intermediária) foi possível estimar o potencial energético teórico dos resíduos pecuários de cada local observado estudado.

4.2.3 Medidas de localização e espacialização

Os estudos para compreender a dinâmica causada pela distribuição espacial da produção na economia têm se concentrado na análise da especialização e localização da atividade, por meio da utilização de indicadores estatísticos que contrastam com os diferentes tipos de produção de um território observado e referência. Os indicadores de especialização medem a especialização produtiva de cada região, ou seja, como as regiões distintas são de alguma referência. Os indicadores de localização medem a concentração regional dos setores (Mendoza Tolosa; Campo Robledo, 2017; Monasterio, 2011).

Quociente locacional

O Quociente de Locacional (QL), Equação (4.2), é um indicador de concentração de produção que evidencia a taxa de especialização. Esse quociente é utilizado na análise de localização para medir a distribuição espacial de fatores em uma região, além de refletir o grau de especialização e aglomeração industrial de um setor industrial (Wu *et al.*, 2022).

$$QL = \frac{\frac{E_{ki}}{E_i}}{\frac{E_k}{E}} \quad (4.2)$$

Em que E_{ki} é a Energia potencial teórica (EPT) de um tipo de rebanho; E_i é a energia na região, ou seja, a soma das EPT do local observado; E_k é a energia potencial teórica do tipo de rebanho na região de referência; e E é o somatório de E_i , que corresponde a área total estudada.

Para essa pesquisa foram utilizadas as médias da década de 2000 a 2009, de 2010 a 2019, bem como, o ano de 2020 para a análise e elaboração de mapas para as regiões imediatas e municípios.

Índice de Hoover

O índice de desigualdade de Hoover (H) ou índice Robin Hood, Equação 4.3, expressa a parcela da renda total que deve ser transferida da metade rica para a metade pobre, a fim de alcançar uma renda igual para cada família. O índice Robin Hood normalmente assume valores entre 0 e 1, onde 0 representa a igualdade perfeita e 1 a desigualdade completa (van den Brakel; Lok, 2021; Vasilescu; Serebrenik; van den Brand, 2011).

$$H = \frac{1}{2} \sum_k^n \left| \frac{E_{ki}}{E_k} - \frac{1}{n} \right| \quad (4.3)$$

Em que H representa o nível de desigualdade ou concentração; n é o número de cidades ou regiões observadas; E_{ki}/E_k é a parcela da EPT por tipo de rebanho k na região i , em relação a E_k .

Índice de Krugman

O Índice de dessemelhança ou de especialização de Krugman (SI), Equação 4.4, é um índice de dissimilaridade, que indica a diferença entre as estruturas setoriais na cidade ou região observadas em comparação com outras, variando de 0 a 2. Os valores absolutos da diferença entre a participação dos setores econômicos na atividade total foram tomados para se observar a dessemelhança entre os sítios analisados (Longhi; Musolesi; Baumont, 2014; Monasterio, 2011).

$$SI_{ij} = \sum_k \left| \frac{E_{ki}}{E_i} - \frac{E_{kj}}{E_j} \right| \quad (4.4)$$

Em que E_{ki} e E_{kj} são, respectivamente, a energia potencial teórica de cada rebanho na cidade ou região observada e na cidade ou região de referência;

E_i e E_j são o total da energia potencial teórica em cada cidade ou região, sendo i a cidade ou região comparada e j a região ou cidade de referência.

Para análise desse índice, os resultados das médias das décadas de 2000 a 2009, de 2010 a 2019; do ano de 2020, e a média entre os anos 2000 a 2020 foram utilizados.

Índice de Ellison-Glaeser

O Índice de Ellison-Glaeser (EG), Equação 4.5, é um índice de aglomeração que considera a parcela do emprego de uma indústria dentro de uma região, a parcela do emprego industrial agregado dentro de uma região e a concentração de mercado de uma indústria simultaneamente. Esse índice é baseado na comparação entre as distribuições geográficas observadas das empresas em uma distribuição aleatória (modelo de arremesso de dardos), bem como, a aglomeração adicional causada por *spillovers* específicos do setor e vantagens naturais localizadas (Ellison; Glaeser, 1997; Lin; Li; Yang, 2011).

Quando o valor obtido é nulo, indica que as decisões locacionais das empresas foram realizadas de forma aleatória, o emprego não está distribuído uniformemente. Se o resultado é positivo, indica que o setor analisado possui uma concentração maior do que aquela esperada a partir de decisões locais aleatórias. Caso o resultado seja negativo, o índice reflete uma tendência de desconcentração espacial das unidades de negócio (Araujo; Moura; Rocha, 2017).

$$EG_k = \frac{G - (1 - \sum_i x_i^2) HHI}{(1 - \sum_i x_i^2)(1 - HHI)} \quad (4.5)$$

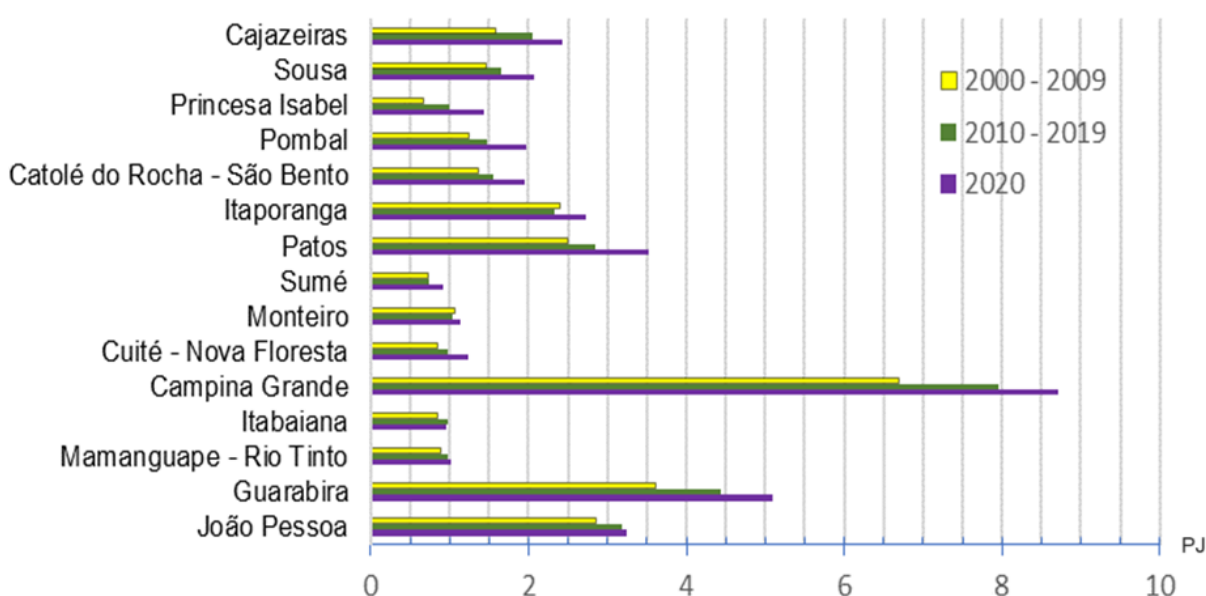
em que, $G = \sum_i (s_i - x_i)^2$, que corresponde ao Índice de concentração bruta; $H = \sum_p z_p^2$ representa o Índice de Herfindahl. Onde, s_i é a parcela da EPT por tipo de rebanho k na região i , ou seja, E_{ki}/E_k ; x_i é a participação da EPT da cidade ou região observada na área total estudada (E_i/E); Z_p é a participação do tipo de rebanho k na cidade ou região i na EPT da área estudada (E_{ki}/E).

O Índice de Herfindahl-Hirschman (HHI) é uma medida absoluta de concentração/especialização utilizada de forma abrangente. O índice de Herfindahl-Hirschman aumenta com o grau de concentração/especialização, atingindo seu limite superior de 1 quando um ramo econômico está concentrado em uma região, ou quando uma região se especializa em apenas um ramo (Goschin *et al.*, 2009).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4.2 mostra a evolução do potencial energético dos resíduos pecuários por região imediata. Os valores foram estimados para a média dos valores da década de 2000 a 2009, de 2010 a 2019 e para o ano de 2020. Foi possível observar que a energia potencial aumenta quando comparada do último período com o primeiro analisado, indicando um crescimento no potencial energético.

Figura 4.2. Evolução do potencial energético de resíduos animais, na PJ, nas regiões imediatas da Paraíba, de 2000 a 2020.



Fonte: O Autor (2022).

A região imediata de Campina Grande no período analisado apresenta o maior potencial energético, entre 6,7 e 8,7 PJ anuais. Para a média da primeira década analisada verificou-se que a região imediata de Princesa Isabel apresentou o menor potencial, para a média da segunda década, a região com menor potencial foi Sumé, como foi para o ano de 2020. Campina Grande é a região que, em números absolutos, se isola na primeira posição. Outros aspectos, como o valor máximo estimado e mínimo, o ano de ocorrência e a energia potencial média por região intermediária, são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Potencial energético de resíduos animais por região imediata da Paraíba, considerando os valores médios anuais, máximos e mínimos, em PJ, no período de 2000 a 2020.

Região Imediata	Média 2000 - 2020	Desvio padrão 2000-2020	Valor máximo/Ano	Valor mínimo/Ano
João Pessoa	3.030	0.27	3.467 2014	2.549 2002
Guarabira	4.074	0.54	5.090 2020	3.267 2002
Mamanguape - Rio Tinto	0.937	0.09	1.050 2018	0.729 2001
Itabaiana	0.912	0.09	1.009 2010	0.677 2006
Campina Grande	7.388	0.86	8.719 2020	5.939 2001
Cuité - Nova Floresta	0.926	0.15	1.227 2020	0.700 2002
Monteiro	1.057	0.11	1.291 2011	0.884 2000
Sumé	0.739	0.07	0.913 2020	0.608 2012
Patos	2.704	0.49	6.619 2011	2.001 2000
Itaporanga	2.388	0.23	2.728 2020	1.676 2012
Catolé do Rocha - São Bento	1.478	0.32	1.945 2020	1.006 2001
Pombal	1.381	0.31	1.978 2020	0.961 2001
Princesa Isabel	0.858	0.26	1.428 2020	0.525 2001
Sousa	1.583	0.24	2.073 2020	1.071 2012
Cajazeiras	1.850	0.35	2.426 2020	1.341 2003
Paraíba	31.304	3.79	38.42 2020	25.478 2001

Fonte: Os autores (2022).

As regiões de Itabaiana e Itaporanga são as que menos cresceram anualmente, demonstrando uma estagnação não só no potencial energético, mas também para a produção

pecuária da região. Por outro lado, a região da Princesa Isabel é a região que mais cresceu ao longo dos 21 anos analisados, seguida da região de Pombal e Patos. Em 2020 foi o ano com a maior frequência de registros de potencial energético por região imediata, enquanto 2001 foi a maior frequência dos piores números de potencial energético por região intermediária. Ao analisar os dados ano a ano, é possível notar dois momentos de queda nos índices de potencial energético estimados nos anos 2000 e meados de 2011 e 2012, devido à queda no número de animais pastoreados no estado.

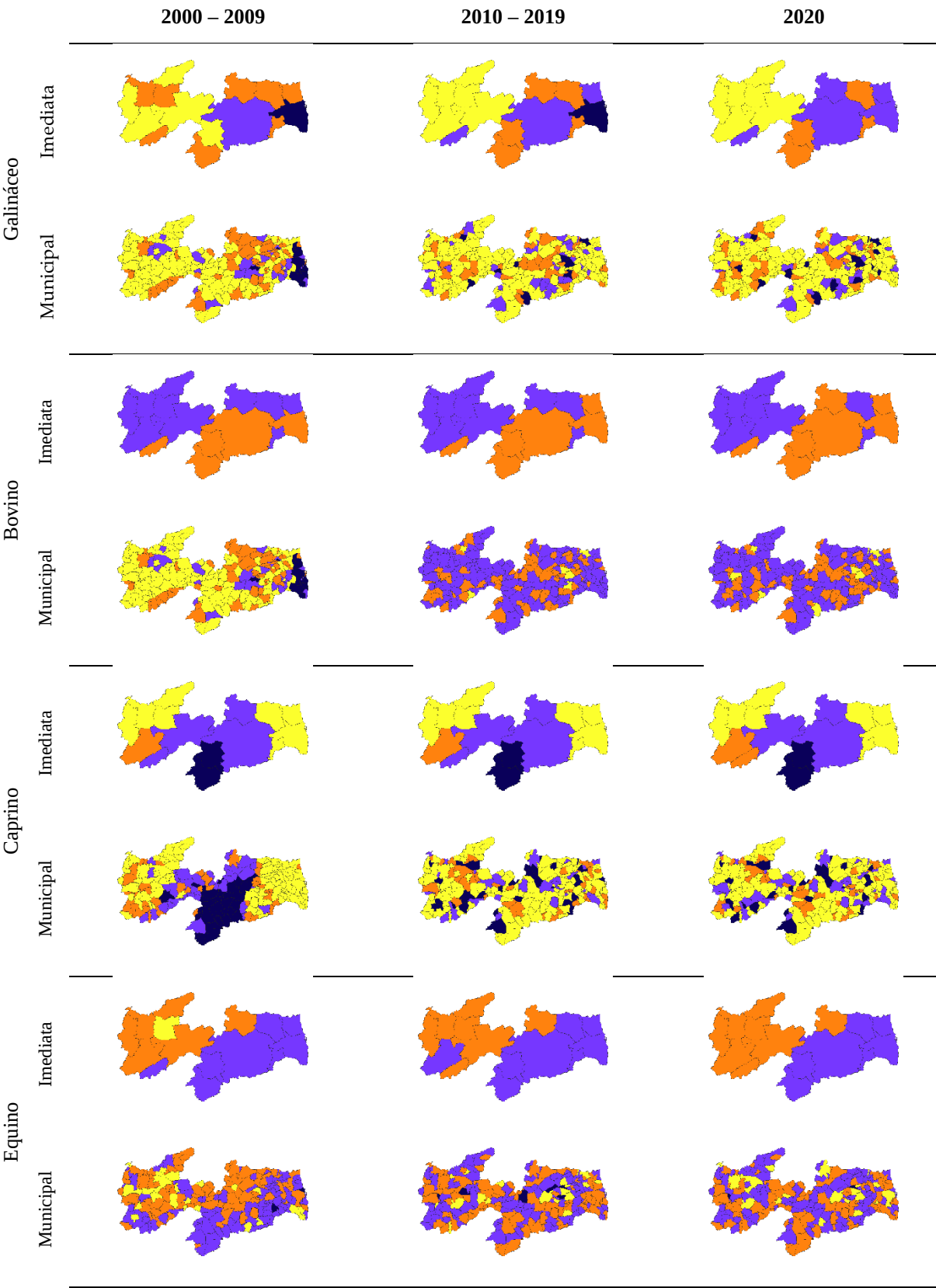
Em meados de 1998 a 2000 e de 2012 a 2014 houve um agravamento das secas no Brasil, o que impactou severamente a agricultura, apesar da Paraíba, que assim estabeleceu uma relação direta entre precipitação e estaca de rebanho, elucidando o efeito de uma diminuição do potencial energético em razão da diminuição dos rebanhos. As regiões intermediárias do estado de Patos e de Sousa – Cajazeiras foram as mais afetadas pela seca de 2012 (Duarte *et al.*, 2018b).

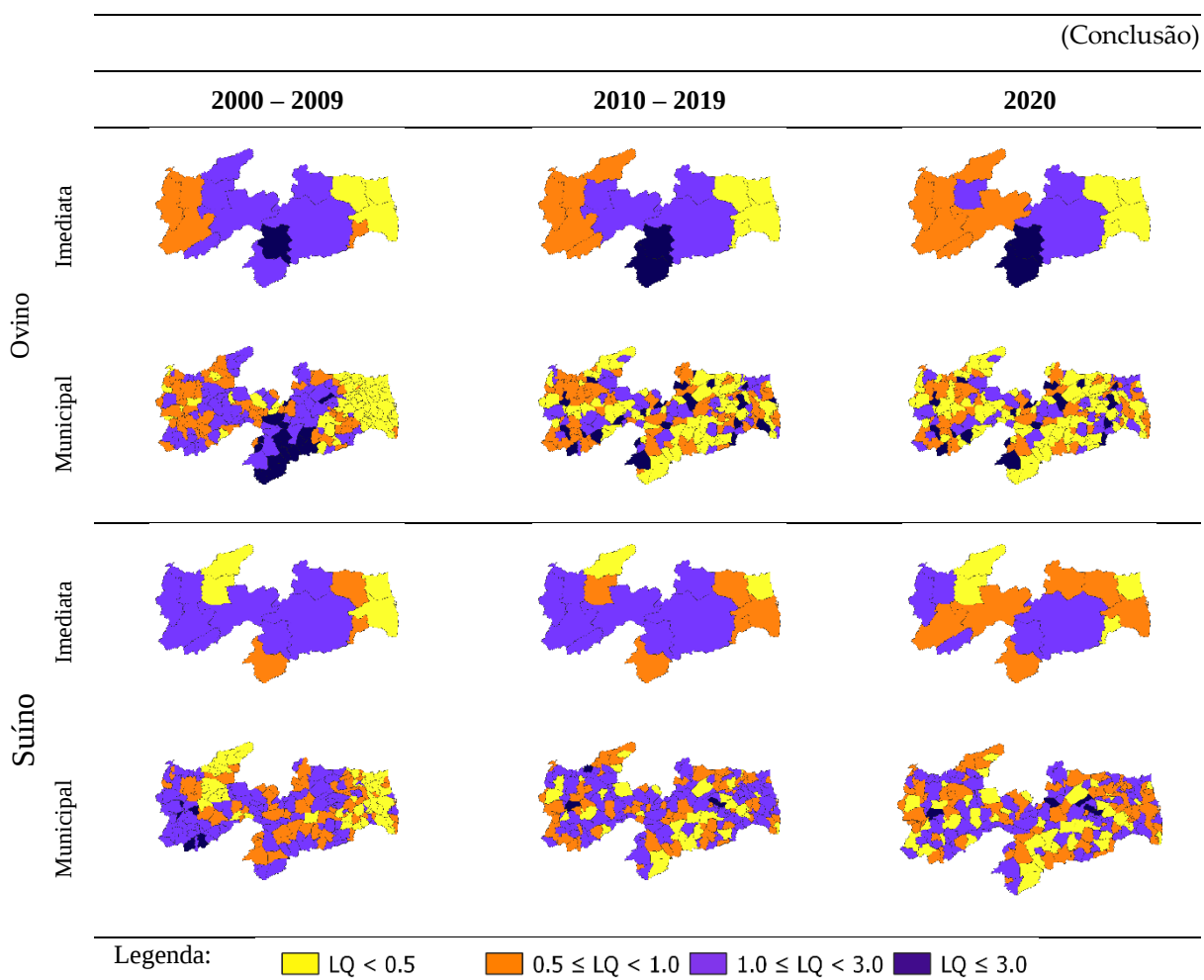
4.3.1 Concentração por Quociente Locacional

A Tabela 4.4 apresenta a evolução do Quociente Locacional à luz do potencial energético dos resíduos animais. O potencial energético do setor galináceo apresentou uma concentração crescente ao longo do tempo em direção ao leste do Estado, onde as regiões imediatas de Sousa e Pombal tiveram uma queda da concentração média para a fraca na segunda década analisada e assim permanecendo para o ano de 2020. As regiões de Itabaiana e Guarabira apresentaram uma concentração média ao longo do período, o que é compatível com a concentração média dos municípios e poucas outras categorias de concentração nos municípios da região. O maior QL observado foi de 4,02 em 2008 na região imediata de João Pessoa e o menor em 2020 na região imediata de Pombal com QL igual a 0,129. A região com maior QL médio foi João Pessoa (QL = 3,281) e a região com menor QL médio foi Cajazeiras (QL = 0,269).

Tabela 4.4 - Evolução do QL do EPT por tipo de rebanho nas regiões imediata e municipal da Paraíba.

(Continua)





Fonte: Os autores (2022).

A concentração para o potencial energético do substrato bovino manteve-se constante em cada região imediata da Paraíba, com exceção da região imediata de Mamanguape - Rio Tinto, que diminuiu para concentração média na segunda década, mantendo-se assim até o ano de 2020, e com a redução para média concentração da região de Cuité – Nova Floresta em 2020. O estrato municipal apresenta um QL > 3 nos municípios do litoral estadual na primeira década, na segunda e no ano de 2020 houve uma disseminação de alta concentração no Estado, sendo a categoria majoritária. O maior QL observado foi de 1,208 em 2020 na região imediata de Pombal e o menor em 2013 na região imediata de João Pessoa com QL igual a 0,623. A região com maior QL médio foi Catolé do Rocha - São Bento (QL = 1,164) e a região com menor QL médio foi João Pessoa (QL = 0,690).

A energia potencial dos resíduos caprinos teve valor constante em todas as regiões imediatas para os períodos analisados, quando se observa a dinâmica municipal, percebe-se nos municípios ao Norte e Oeste da região imediata de Campina Grande, na Região do Sumé e na região do Monteiro, com exceção da cidade de Monteiro, apresentaram uma concentração muito elevada na primeira década, homogeneizada na década seguinte e em 2020, período em que a

cidade de Monteiro tem uma concentração muito elevada. O maior QL observado foi de 6,744 em 2009 na região imediata do Sumé e o menor em 2001 na região imediata de Mamanguape – Rio Tinto com QL igual a 0,125. A região com maior QL médio foi Sume (QL = 6,035) e a região com menor QL médio foi João Pessoa (QL = 0,176).

A concentração da energia potencial do estrume suíno foi constante nos períodos analisados com QL maior ou igual a 1 e menor que três (Alto) para as regiões imediatas de Campina Grande, Sumé, Cajazeiras, Sousa e Princesa Isabel. Há uma consolidação da altíssima concentração na cidade de Aguiar, Esperança e Alagoa Nova. O maior QL observado foi de 3,148 em 2007 na região imediata de Princesa Isabel e o menor em 2000 na região imediata de Mamanguape – Rio Tinto com QL igual a 0,136. A região imediata com maior QL médio foi Princesa Isabel (QL = 2,491) e a região com menor QL médio foi Catolé do Rocha - São Bento (QL = 0,367).

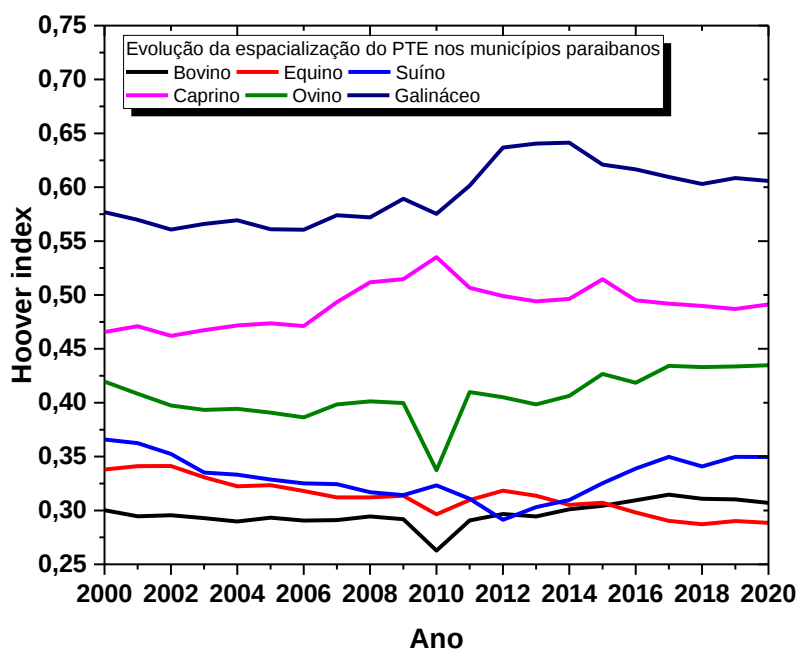
O QL de substratos ovinos apresentou concentração muito alta nos municípios ao sul da região intermediária de Monteiro e sudeste de Campina Grande na primeira década, na década seguinte e para o ano de 2020, houve uma pulverização dos municípios de altíssima concentração em todo o Estado. Identificou-se um crescimento médio da concentração nas regiões imediatas em direção ao litoral durante os períodos analisados. O maior QL observado foi de 5,067 em 2003 na região imediata do Sumé e o menor em 2020 na região imediata de Mamanguape – Rio Tinto com QL igual a 0,139. A região com maior QL médio foi Sumé (QL = 4,463) e a região com menor QL médio foi Mamanguape - Rio Tinto (QL = 0,187).

Para a concentração do potencial energético dos rebanhos equinos, houve uma constância ao longo dos períodos analisados nas regiões imediatas com exceção de Pombal, que na segunda década passou de fraca para média concentração, de Itaporanga, que passou de média a alta concentração na segunda década e Princesa Isabel que teve dinâmica inversa, e assim permaneceram até o ano de 2020. O maior QL observado foi de 2,821 em 2006 na região imediata de Itabaiana e o menor em 2003 na região imediata de Pombal com QL igual a 0,408. A região com maior QL médio foi Itabaiana (QL = 2,049) e a região com menor QL médio foi Pombal (QL = 0,495).

4.3.2 Espacialização pelo Índice Hoover

A evolução na espacialização do potencial energético dos rebanhos nos municípios paraibanos ao longo do período analisado pode ser observada na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Evolução da Espacialização pelo Índice Hoover da energia potencial teórica de rebanhos nos municípios da Paraíba, no período de 2000 a 2020.



Fonte: O autor (2022).

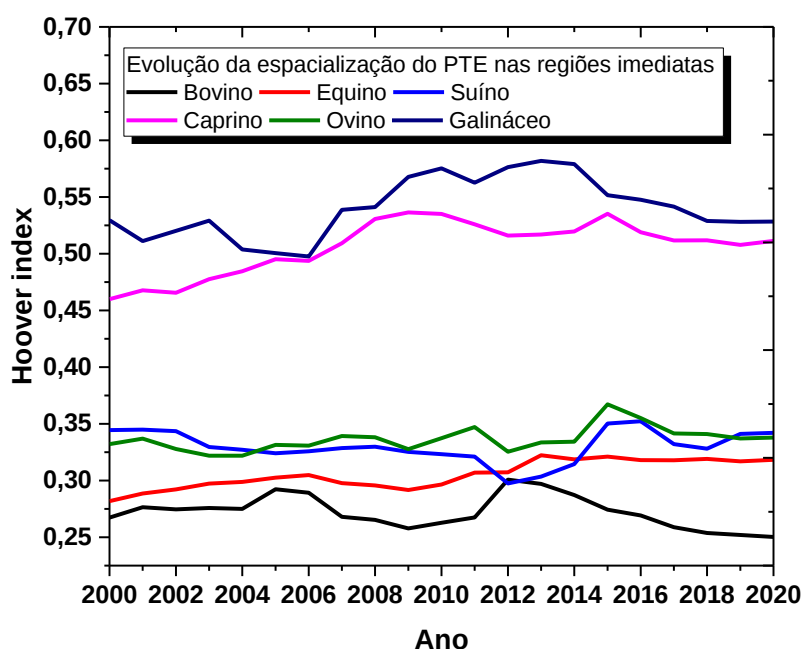
Ao longo dos 21 anos analisados, foram observadas mudanças no quadro em 2010, onde todos os rebanhos apresentaram redução de H para EPT, com exceção de caprinos e suínos, apresentando-se, assim, uma pulverização mais homogênea dos rebanhos, consequentemente uma menor concentração espacial de EPT. Nos anos seguintes, 2011 e 2012, anos de maior severidade de seca de 2011 a 2014, houve um aumento de rebanhos em relação a 2010, além de caprinos em queda desde o ano anterior, e uma desconcentração apenas para suínos e caprinos.

Em 2012, houve redução das cabeças de todos os rebanhos, com exceção das galináceas, e aumento da concentração espacial de bovinos, equinos e galinhas. Durante o período de 2000 a 2020 a maior concentração espacial foi galinácea em 2014 ($H = 0,641$) e a menor foi para o rebanho bovino EPT em 2010 ($H = 0,263$), as médias do Índice Hoover para EPT para cada rebanho ao longo dos 21 anos são de 0,297 para bovinos; 0,312 para os equinos; 0,331 para os suínos; 0,491 para os caprinos; 0,406 para ovinos e 0,593 para galinaceos, indicando que há uma concentração média maior em comparação com outros animais.

A Figura 4.4 mostra a evolução da espacialização nas regiões imediatas da Paraíba. Observa-se que a concentração espacial de caprinos e frangos em relação a outros rebanhos é ligeiramente maior, com H entre 0,45 e 0,6. As médias do Índice Hoover quando observamos

as regiões imediatas de 2000 a 2020 são para o rebanho bovino de 0,272; equino de 0,305; suínos de 0,330; cabra de 0,506; 0,336 e 0,54 galináceos. O maior valor do índice nos anos pesquisados foi para o rebanho de galináceos, com $H = 0,5819$ em 2013 e o menor valor foi para o rebanho bovino com 0,25 em 2020.

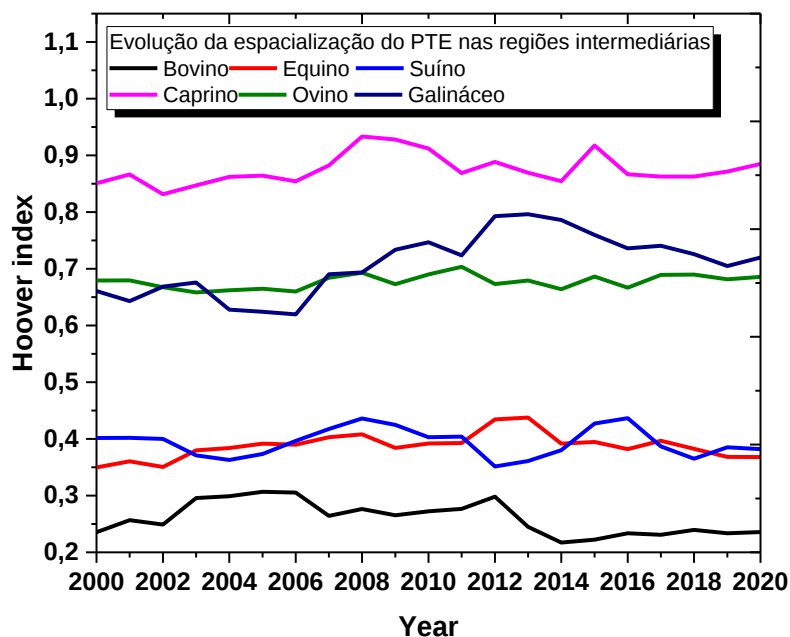
Figura 4.4 - Evolução da Espacialização pelo Índice Hoover da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões imediatas da Paraíba, no período de 2000 a 2020.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 4.5 mostra a evolução da espacialização do potencial energético da pecuária nas regiões intermediárias da Paraíba. Observou-se que a concentração espacial dos caprinos em relação aos demais rebanhos foi significativamente maior, isolada, com H acima de 0,8 durante o período pesquisado. Os potenciais energéticos dos rebanhos ovinos e de frango são os segundos em concentração espacial durante o período analisado, com H entre 0,6 e 0,8. As médias do Índice Hoover quando observado as regiões intermediárias de 2000 a 2020 são para o rebanho bovino de 0,26; equino de 0,388; suíno de 0,394; o rebanho caprino foi 0,875; já o rebanho ovino foi de 0,678 e 0,708 para o rebanho galináceo. O maior valor do índice nos anos pesquisados foi para o rebanho caprino, com $H = 0,933$ em 2008 e o menor valor foi para o rebanho bovino com 0,217 em 2014.

Figura 4.5 - Evolução da Espacialização pelo Índice Hoover da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões intermediárias da Paraíba, no período de 2000 a 2020.

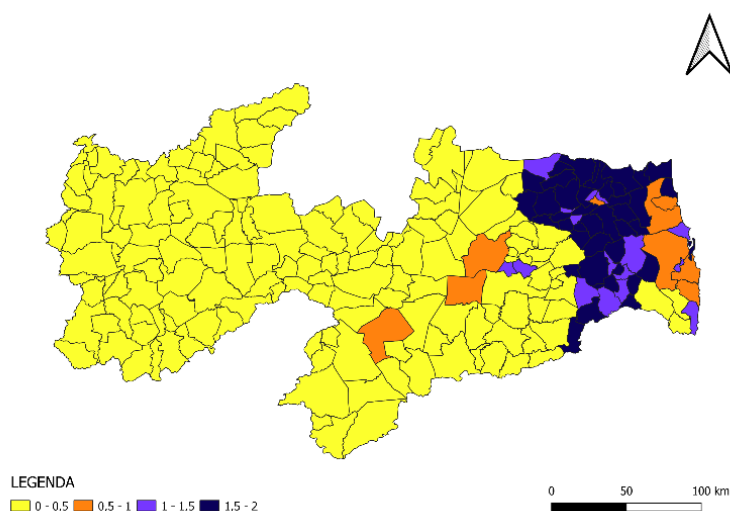


Fonte: O autor (2022)

4.3.3 Dissimilaridade pelo índice de Krugman

A Figura 4.6 mostra a dissimilaridade do EPT municipal para a primeira década classificado a partir do Índice de Krugman. Observou-se a evolução da dessemelhança entre os municípios paraibanos com a energia potencial teórica da pecuária considerando os municípios de referência em cada região intermediária. O índice de Krugman da primeira década (2000 a 2009), da segunda (2010 a 2019) e do ano de 2020 foi comparado.

Figura 4.6. Índice Krugman de energia potencial municipal de resíduos animais da Paraíba, valores médios entre 2000 e 2009.

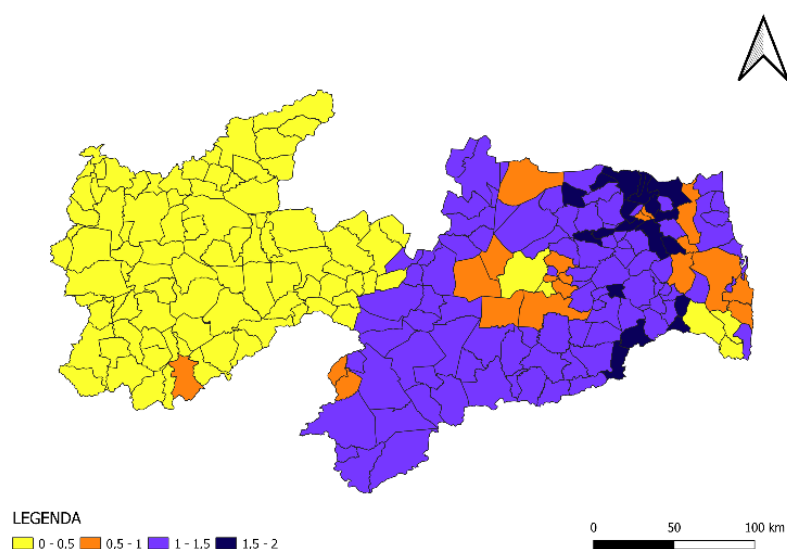


Fonte: O Autor (2022)

Observou-se que a dissimilaridade é maior nos municípios da região intermediária de João Pessoa. Percebeu-se na primeira década que o Estado se comporta de forma homogênea, além dos municípios da região de João Pessoa, e com destaque para alguns municípios da região de Campina Grande. A Figura 4.7 mostra a dissimilaridade municipal para o EPT nos rebanhos na média da segunda década classificada a partir do Índice de Krugman.

O SI médio da segunda década apresenta maior dissimilaridade em relação à década anterior nos municípios da região intermediária de Campina Grande, com valores de SI de 1 a 1,5 principalmente. Destacam-se os municípios de Pocinhos e Puxinanã, com baixa dissimilaridade ($0 \leq SI \leq 0,5$). Na região intermediária de João Pessoa, os municípios de Pedras de Fogo, Alhandra e Caaporã também apresentam SI baixo. Nas regiões intermediárias de Patos e Sousa-Cajazeiras há uma homogeneidade no SI, sendo baixa, além do município de Princesa Isabel.

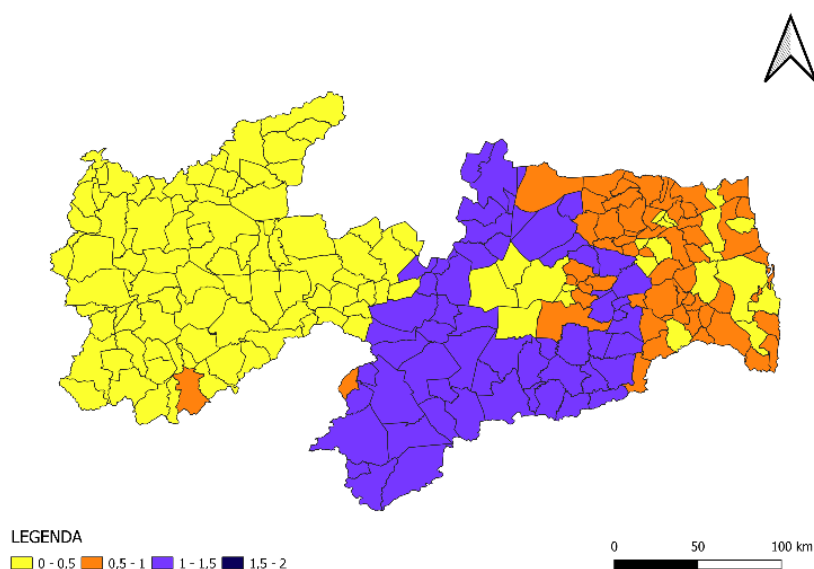
Figura 4.7 - Índice Krugman da energia potencial municipal de resíduos animais na Paraíba, valores médios entre 2010 e 2019.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 4.8 mostra a dissimilaridade entre os municípios do EPT dos rebanhos em 2020. Em 2020, as regiões intermediárias de Patos e Sousa-Cajazeiras permaneceram baixas com a SI, além da princesa Isabel. A região de Campina Grande apresentou uma expansão dos municípios de Baixo SI também agregando ao núcleo as cidades de Montadas, Olivedos, Soledade e Boa Vista. Na região de João Pessoa, houve queda para a especialização média ($0,5 \leq SI < 1$), indicando uma diminuição na dissimilaridade entre os pecados de EPT dos municípios da região intermediária.

Figura 4.8 - Índice Krugman da energia potencial municipal de resíduos animais na Paraíba em 2020.

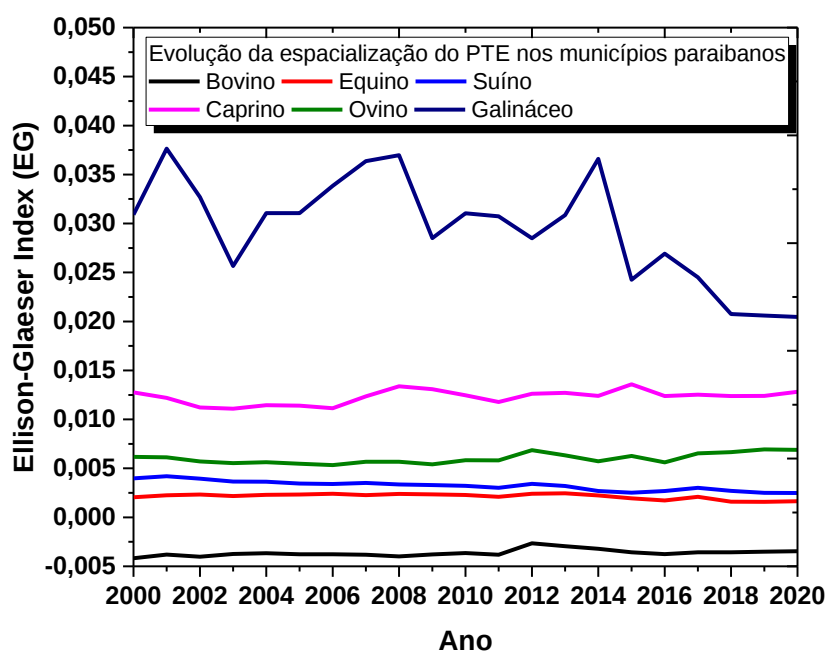


Fonte: O Autor (2022).

4.3.4 Especialização pelo índice de Ellison-Glaeser

O EPT de bovinos evolui abaixo dos ordenados, indicando uma tendência de desconcentração das atividades pecuárias, menos com aumento ao longo dos anos. Os demais rebanhos evoluem no índice acima de 0, indicando uma aglomeração espacial das atividades pecuárias e uma consequente aglomeração espacial do potencial energético. O rebanho galináceo apresenta uma evolução variada, porém com índices de EG acima de 0,02 durante os 21 anos pesquisados, com ligeira distância dos demais rebanhos. A Figura 4.9 mostra a evolução da especialização do ETP pecuário nos municípios da Paraíba.

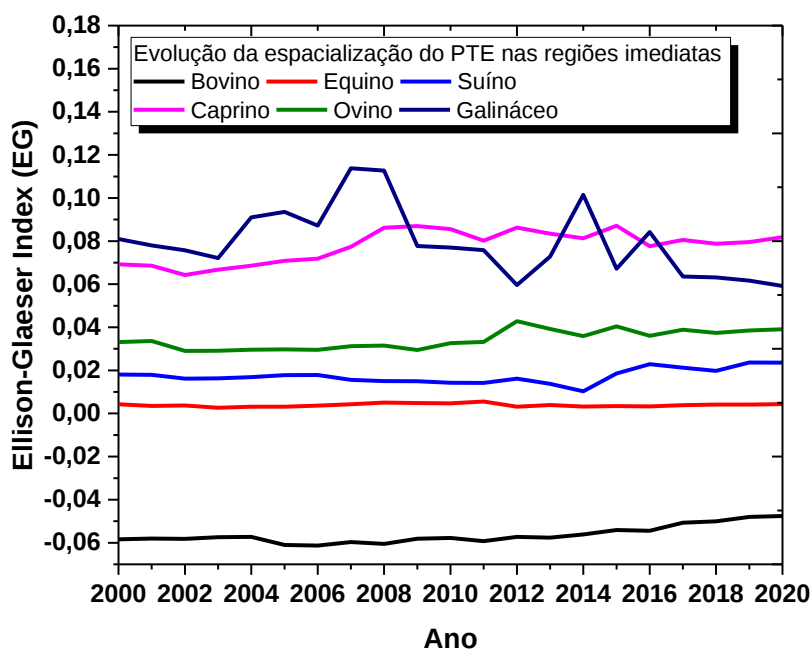
Figura 4.9 - Evolução da espacialização pelo Índice de Ellison-Glaeser da energia potencial teórica de rebanhos nos municípios da Paraíba, no período de 2000 a 2020.



Fonte: O autor (2022)

O maior EG ocorreu em 2001, com $EG = 0,037$ para o rebanho galináceo, seguido pelos anos de 2008 e 2014 com $EG = 0,036$. Os menores valores de EG são do rebanho bovino em 2000 com EG negativo de 0,0042, seguido dos anos de 2002 e 2008 com EG negativo de 0,004. A Figura 4.10 mostra a evolução da espacialização do EPT nas regiões imediatas da Paraíba.

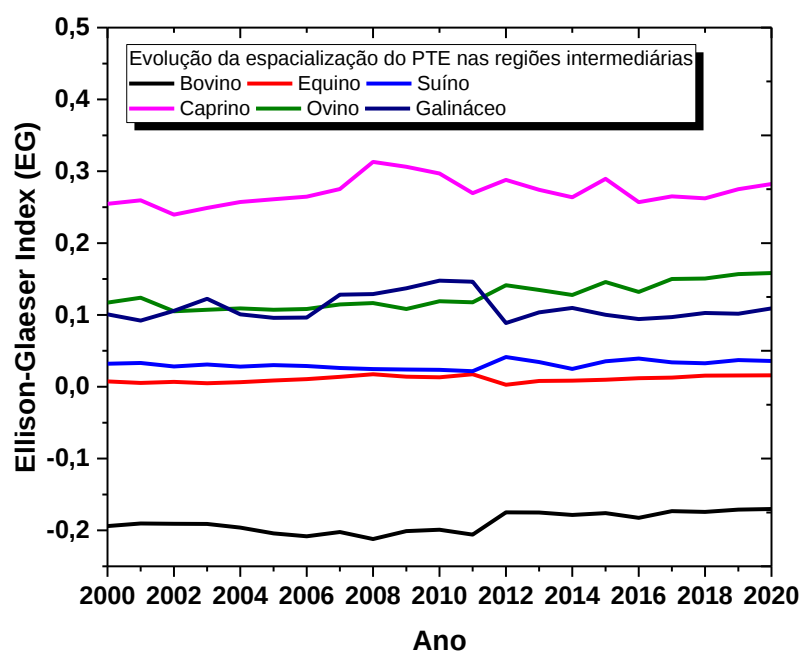
Figura 4.10 - Evolução da espacialização pelo Índice de Ellison-Glaeser da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões imediatas da Paraíba, no período de 2000 a 2020.



Fonte: O Autor (2022).

Assim como a análise municipal, o rebanho bovino continua a indicar um desagrupamento espacial, e o oposto se manifesta com os demais rebanhos. Os rebanhos caprinos têm um crescimento ao longo dos anos e em 2016 consolidou-se acima da aglomeração do rebanho galináceo, com EG de 0,08 em 2020. Por outro lado, o rebanho galináceo após sucessivas oscilações estabilizou em torno de 0,06. O índice de EG para os rebanhos equinos manteve-se praticamente constante, muito próximo de 0, indicando uma estagnação e uma disposição aleatória dos rebanhos. Por meio da Figura 4.11, é possível observar a dinâmica da aglomeração espacial das atividades pecuárias e, conseqüentemente, do ETE dos rebanhos nas regiões intermediárias.

Figura 4.11 - Evolução da Espacialização pelo Índice de Ellison-Glaeser da energia potencial teórica de rebanhos nas regiões intermediárias da Paraíba, no período de 2000 a 2020.



Fonte: O autor (2022).

Observou-se que o EPT de rebanhos caprinos liderou isoladamente com EG em torno de 0,3. Seguido por ovinos e rebanhos galináceos com EG em torno de 0,1. O EG do EPT de bovinos ainda apresenta uma tendência de desaglomeração espacial com EG negativo de 0,17 em 2020.

Os índices de Ellison-Glaeser e Hoover indicaram uma aglomeração espacial de EPT do rebanho caprino ao longo dos anos. Ambos os indicadores mostraram a sequência de aglomeração com rebanhos ovinos e galináceos, mas somente pelo Índice de Ellison-Glaeser foi possível mostrar uma tendência de desaglomeração do rebanho bovino.

4.4 CONCLUSÃO

Por meio da análise regional foi possível compreender o comportamento da atividade pecuária para diferentes rebanhos no Estado da Paraíba, observando os níveis municipal e regional (imediato e intermediário), e consequentemente foi possível estimar o potencial energético dos resíduos animais ao longo dos 21 anos estudados utilizando os índices de concentração e especialização.

Ao estimar o potencial energético, observou-se que a Paraíba pode produzir em média cerca de 31,3 PJ de bioenergia animal a cada ano. A região imediata de Campina Grande tem o

maior potencial energético médio anual, cerca de 7,38 PJ, seguida pela região imediata de Guarabira e João Pessoa, com 4,07 PJ e 3,03 PJ, respectivamente.

A partir do QL, observou-se concentração significativa de EPT em rebanhos caprinos e ovinos nas regiões imediatas de Sumé e Monteiro ($QL > 3$). A partir dos Índices de Hoover e Ellison-Glaeser foi possível observar o quanto o potencial energético dos dejetos animais é desagrupado, revelando uma alta desigualdade dos rebanhos galináceos quando observado em nível municipal, embora, quando observado no nível da região intermediária, a maior relevância dos rebanhos caprinos seja observada.

Por meio do Índice Krugman, observou-se a dissimilaridade municipal quanto à contribuição no total estimado de EPT.

Assim, percebeu-se a formação de núcleos de menor dissimilaridade nas regiões intermediárias, formadas por municípios com EPT semelhante. A formação de tais núcleos pode favorecer, com estudos futuros, a indicação de sítios para complexos bioenergéticos.

Assim, o conjunto de índices utilizados neste trabalho, à luz dos estudos em economia regional, pode, preliminarmente, fornecer subsídios para futuros estudos e formulação de políticas regionais de natureza agrícola e bioenergética.

4.5 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (22 C.E.). Matriz elétrica brasileira. In <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>.

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>.

Aghel, B., Behaein, S., Wongwises, S., & Shadloo, M. S. (2022). A review of recent progress in biogas upgrading: With emphasis on carbon capture. *Biomass and Bioenergy*, 160, 106422. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106422>.

Ajay, C. M., Mohan, S., & Dinesha, P. (2021). Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. *Waste Management*, 125, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>.

Alves, L. R. (2012). Indicadores de Localização, Especialização e Estruturação Regional. In C. A. Piacenti & J. F. Lima (Eds.), *Análise Regional: Metodologias e Indicadores* (pp. 25–44). Camões.

Araujo, J. E. S., Moura, K. H. de L., & Rocha, R. de M. (2017). *Evidências da distribuição espacial das indústrias do Nordeste brasileiro a partir do Índice de Ellison e Glaeser*.

Avellar, L. H. N. (2001). *Valorização dos subprodutos da agroindústria visando a cogeração e a redução da poluição ambiental*. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Banco do Nordeste do Brasil. (2024). *Cenário Macroeconômico, ano 4, n.1, mar. 2024 (Paraíba)*.

Caetano, B. C., Santos, N. D. S. A., Hanriot, V. M., Sandoval, O. R., & Huebner, R. (2022). Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a Stirling engine. *Energy Conversion and Management: X*, 15, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224>

Coelho Junior, L. M., Burgos, J. V. de C., Santos Júnior, E. P., Diniz, F. F., Martins, J. M., Maurício, C. F. B., Gehrke, C. S., & Gomes, F. da S. V. (2023). Localização e especialização da produção extrativista dos produtos madeiros nas regiões imediatas de Pernambuco. *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, 14(7), 10847–10862. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2447>

Colatto, L., & Langer, M. (2012). Biodigestor – resíduo sólido pecuário para produção de energia. *Unoesc & Ciência - ACET*, 2(2), 119–128. <https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/738>

Duarte, J. G. P., Farias, A. A. de, Sousa, F. de A. S. de, Souza, J. T. A., & Ramos, M. M. Q. (2018). Secas e Impactos na Agropecuária no Município de Campina Grande - PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(2), 289–297. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332008>

Ellison, G., & Glaeser, E. L. (1997). Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. *Journal of Political Economy*, 105(5), 889–927.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. (2022). *Esterqueira*. Embrapa Caprinos e Ovinos. <https://www.embrapa.br/paratec-controle-integrado-verminoses/vermes/caprinos-ovinos/esterqueira>

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2022). *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2022*.

Goschin, Z., Constantin, D. L., Roman, M., & Ileanu, B. (2009). Specialisation and Concentration Patterns in the Romanian Economy. *University Library of Munich, Germany*.

Guares, S. A., Lima, J. D. de, & Oliveira, G. A. (2021). Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer. *Biomass and Bioenergy*, 150, 106107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106107>

IBGE. (2017). *Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017*. IBGE.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2017). *Classificação e Caracterização dos Espaços Rurais e Urbanos do Brasil*. https://www.ibge.gov.br/apps/rural_urbano/#/home

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2022a). *Produção Agropecuária no Brasil em 2021*. <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2022b). *Produto Interno Bruto - PIB da Paraíba em 2019*. [https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php#:~:text=No%20%C3%BAltimo%20trimestre%20divulgado%20\(2%C2%BA,%24%202%20404%2C0%20bilh%C3%B5es](https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php#:~:text=No%20%C3%BAltimo%20trimestre%20divulgado%20(2%C2%BA,%24%202%20404%2C0%20bilh%C3%B5es)

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2022c). *Tabela 3939 - Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho*. <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2023). *Panorama do Brasil - IBGE Cidades*. <https://Cidades.Ibge.Gov.Br/Brasil/Pb/Panorama>.
- Internacional Renewable Energy Agency - IRENA. (2022). *Renewable energy and jobs annual review 2021*. <https://www.irena.org/Publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>
- International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. www.iea.org/t&c/
- Lin, H.-L., Li, H.-Y., & Yang, C.-H. (2011). Agglomeration and productivity: Firm-level evidence from China's textile industry. *China Economic Review*, 22(3), 313–329. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2011.03.003>
- Longhi, C., Musolesi, A., & Baumont, C. (2014). Modeling structural change in the European metropolitan areas during the process of economic integration. *Economic Modelling*, 37, 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2013.10.028>
- Mattei, T. F., & Mattei, T. S. (2018). Métodos de Análise Regional: um estudo de localização e especialização para a Região Sul do Brasil. *Revista Paranaense De Desenvolvimento - RPD*, 38(Economia, estado e sociedade), 227–243.
- Mendoza Tolosa, H. A., & Campo Robledo, J. (2017). Localización y especialización productiva regional en Colombia. *Revista Finanzas y Política Económica*, 113–134. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2017.9.1.7>
- Monasterio, L. (2011). Indicadores de análise regional e espacial. In B. de O. Cruz, B. A. Furtado, L. M. Monasterio, & W. Rodrigues Júnior (Eds.), *Economia regional e urbana: teorias e métodos com ênfase no Brasil* (pp. 315–331). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA.
- Nogueira, L. A. H., Capaz, R. S., & Lora, E. S. (2021). Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. *Revista Brasileira de Energia*, 27(3). <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i3.640>
- PEREIRA, J. D. M., MARTINS, J. M., FONSECA, A. J. D. S., NUNES, A. M. M., SANTOS JUNIOR, E. P., & COELHO JUNIOR, L. M. (2022). LOCALIZAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DA LENHA DE EXTRATIVISMO E SILVICULTURA NO BRASIL (1990 – 2020). *Anais Do XI Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento: XI CICTED 2022*. <https://doi.org/10.29327/XIcited2022.564447>
- Pérez Hernández, C. C., Lara Gómez, G., & Hernández Calzada, M. (2022). Concentración, diversidad y especialización del cooperativismo en México: aplicación de un Análisis Exploratorio de Datos Espaciales. *REVESCO. Revista de Estudios Cooperativos*, 140, e79941. <https://doi.org/10.5209/reve.79941>
- Quadros, D. G., Oliver, A. de P. M., Regis, U., Valladares, R., Souza, P. H. F. de, & Ferreira, E. de J. (2010). Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4, 326–332.
- Van den Brakel, M., & Lok, R. (2021). The Robin Hood Index Adjusted for Negatives and Equivalised Incomes. *Journal of Official Statistics*, 37(4), 1047–1058. <https://doi.org/10.2478/jos-2021-0044>

Vasilescu, B., Serebrenik, A., & van den Brand, M. (2011). You can't control the unfamiliar: A study on the relations between aggregation techniques for software metrics. *2011 27th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM)*, 313–322. <https://doi.org/10.1109/ICSM.2011.6080798>

World Bioenergy Association - WBA. (2021). *GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2021*.

Wu, X., Zhou, Y., Cheng, C., & Yang, S. (2022). Industrial characteristics of renewable energy and spatial aggregation correlations in Beijing–Tianjin–Hebei. *Science and Technology for Energy Transition*, 77, 3. <https://doi.org/10.2516/stet/2022002>

Yalcinkaya, S., & Ruhbas, Y. (2022). Spatiotemporal analysis framework for identifying emerging hot spots and energy potential from livestock manure in Turkey. *Renewable Energy*, 193, 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.148>

5 ARTIGO 3: HIDRÔGENIO DE BAIXO CARBONO - ARRANJOS BIOENERGÉTICOS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.

RESUMO

As fontes de energia renováveis e em especial as de fonte biológica, a bioenergia, desempenham um papel importante ao mitigar a emissão de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa na atmosfera. A biomassa, matéria-prima para a conversão em bioenergia, pode vir do meio florestal, agrícola, urbano, industrial ou animal. Os energéticos podem ser produzidos pela combustão direta, ou convertidos em biocombustíveis por meio de processos de bioconversão, como biogases (metano, hidrogênio), bioetanol, biodiesel e outros. Esse trabalho teve por objetivo apresentar uma análise bibliométrica na literatura relacionada ao hidrogênio de baixo carbono e arranjos bioenergéticos, para isso utilizou-se da combinação das palavras-chave: *biomass; renewable; anaerobic digestion e hydrogen*. O recorte temporal foi entre os anos de 2002 e 2022. A partir da aplicação de filtros e considerando a relevância do tema incorporado nas atuais discussões, foram analisados 49 trabalhos. O aumento de interesse da comunidade científica pela temática cresceu nos últimos anos, convergindo esforços entorno da bioenergia, renovabilidade das fontes de energia e mudanças climáticas. Diversos trabalhos desde os modelos teorizados ou planejados são elencados a experimentos a nível laboratorial ou industrial, seja em meio agropecuário ou urbano. Além da digestão anaeróbia, outros processos de bioconversão foram abordados, como a fermentação escura e a fotofermentação, acoplados ou isolados, principalmente quando o digerido era a biomassa algal. Também foi abordado a codigestão com substratos animais, vegetais ou de algas. Concluiu-se que a associação de bioprocessos em cascata é uma ação intensiva nas pesquisas para otimizar a produção bioenergética.

Palavras-chave: bio-hidrogênio; biomassa; energia renovável; bioconversão; biocombustível.

ABSTRACT

Green hydrogen - bioenergetic arrangements from bioprocesses: a bibliometric review.

Renewable energy sources, and particularly those from biological sources, bioenergy, play an important role in mitigating the emission of carbon dioxide and other greenhouse gases

into the atmosphere. Biomass, the raw material for conversion into bioenergy, can come from the forest, agricultural, urban, industrial, or animal environment. Energy sources can be produced by direct combustion, or converted into biofuels through bioconversion processes, such as biogases (methane, hydrogen), bioethanol, biodiesel, and others. This work aimed to make a bibliometric analysis in the literature around the combination of keywords: Biomass; Renewable; anaerobic digestion and hydrogen. The time frame was between the years 2002 and 2022. From the application of filters and considering the relevance of the theme incorporated in the discussions, 49 works were analyzed. It was observed the increase of interest of the scientific community for the theme, growing in recent years, converging efforts around bioenergy, the renewability of energy sources and climate change. It lists experiences in various works from theorized or planned models, to experiments at the laboratory or industrial level, whether in agricultural or urban environments. In addition to anaerobic digestion, other bioconversion processes were addressed, such as dark fermentation and photofermentation, coupled or isolated, especially when the digestate was algal biomass. Codigestion with animal, vegetable or algal substrates was also addressed. It was concluded that the association of cascading bioprocesses is a mandatory movement for improvements in bioenergy production.

Keywords: biohydrogen; biomass; renewable energy; biodigestion; biofuels.

5.1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis (ER) são aquelas consideradas inesgotáveis pelos padrões humanos de uso. São apoiadas nos recursos naturais que não diminuem com o tempo, por isso estão sempre sujeitas a renovação. Por exemplo, as fontes renováveis estão dispostas em várias tecnologias e modais, como a energia solar, hidrelétrica, geotérmica, marés e biomassa. Tais tecnologias oferecem um impacto ambiental mínimo e apresentam à economia um meio de neutralização das emissões de carbono. O conceito de energia limpa é frequentemente associado a fontes renováveis, em comparação com os combustíveis fósseis, eles reduzem os impactos ambientais e praticamente não geram resíduos ou emissões de poluentes (Majeed; Luni; Tahir, 2022).

Vários países promovem a disseminação da cultura de inovação e incentivo a pesquisas sobre energia renovável para encontrar alternativas economicamente viáveis e menos poluentes para atender as necessidades energéticas. Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas em projetos comerciais, como sistemas termossolares, ou fotovoltaicos e energia de biomassa. O

sistema solar fotovoltaico usa células fotovoltaicas (SF) que convertem energia solar em eletricidade. O sistema solar térmico (ST) usa coletores solares térmicos que convertem energia solar em calor por meio da radiação direta de calor, que podem ser usados para fins de aquecimento ou resfriamento. A tecnologia de aquecimento de água usando radiação solar é uma escolha econômica tanto para países desenvolvidos ou não. A energia derivada da biomassa, a bioenergia, também desempenha um papel significativo no futuro, reduzindo a quantidade de CO₂ na atmosfera em comparação com os combustíveis fósseis (Deep Singh; Gajera; Sarma, 2022; Tembhare; Barai; Bhanvase, 2022).

A biomassa foi reintegrada no fornecimento de energia de maior escala do mundo, por meios modernos, por meio da gaseificação de madeira e outros materiais, sequestro de carbono e biocombustíveis (Thiruselvi *et al.*, 2021c).

A biomassa vegetal é composta principalmente por lignocelulose, esse composto orgânico é constituído por celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é um polímero de alto peso molecular, a hemicelulose é um material que envolve a estrutura da celulose, enquanto a lignina é uma camada protetora que enrijece a biomassa. A digestão anaeróbia (DA) é um método de notável avanço tecnológico para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos e águas residuais, pois é eficaz no tratamento de resíduos e tem uma excelente recuperação energética (Amin *et al.*, 2017b).

A DA é uma rota tradicional para a conversão de biomassa em biogás, digerido e energia renovável ou até hidrogênio de baixo carbono. Pode ser processada também a partir da mistura de vários materiais. A codigestão melhora a bioconversão de resíduos e a geração de energia, aumentando a disponibilidade de nutrientes para micróbios e carga orgânica, reduzindo a toxicidade química inibitória por meio da diluição do co-substrato (Darai *et al.*, 2021; Kunatsa; Xia, 2022).

O hidrogênio, seja produzido por rotas de produção de baixo e zero carbono – com auxílio de fontes renováveis ou de fontes convencionais – por meio da reforma de combustíveis fósseis ou pirólise de hidrocarbonetos, tem grande flexibilidade como transportador de energia e pode ser usado no setor de transporte rodoviário e ferroviário pesado, navios e aeronaves. Além disso, o hidrogênio pode ser usado em processos industriais e como vetor de energia doméstica para cozinhar e aquecer (Ishaq; Dincer; Crawford, 2022; Reed *et al.*, 2022).

Esse trabalho visa analisar a literatura dos últimos 20 anos acerca da produção de hidrogênio verde a partir da digestão anaeróbia da biomassa. De modo, a introduzir os

fundamentos teóricos do H₂, apontar as métricas bibliográficas das publicações mais recentes, e sintetizar os aspectos apresentados pelos principais trabalhos.

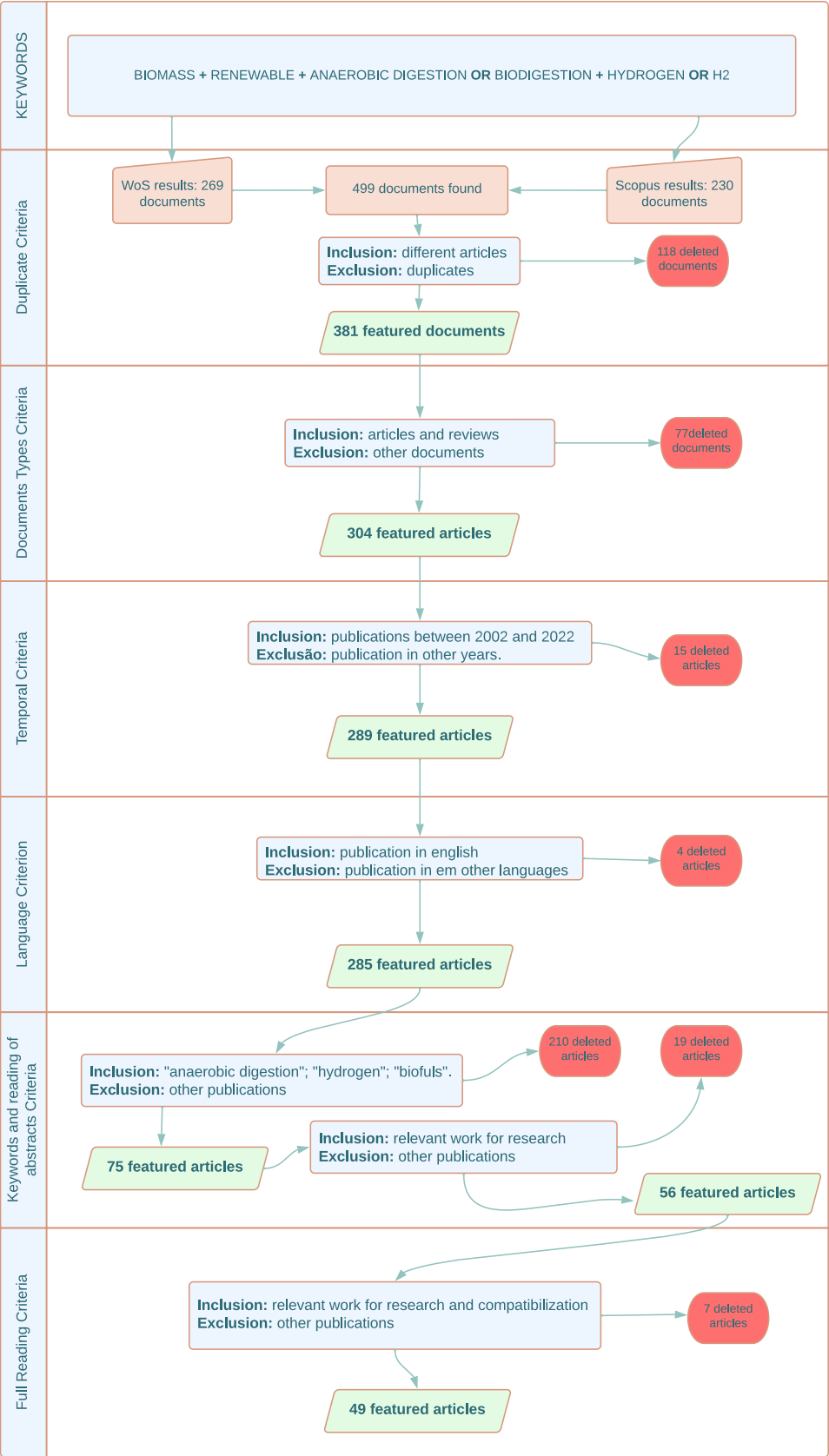
5.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

O levantamento de publicações em periódicos, realizado em 25 de fevereiro de 2023, foi feito utilizando as bases da Web of Science (WoS) da Clarivate e da Scopus da Elsevier. Foram investigadas para todas as entradas, Tópicos – que englobam títulos, resumos, palavras-chave do autor, adicionadas e autores. A pesquisa utilizou as seguintes palavras-chave: Biomass + Renewable + “anaerobic digestion” OR biodigestion + H₂ OR hydrogen.

A pesquisa foi executada em várias etapas, conforme a Figura 5, sendo considerados os seguintes critérios de seleção e refinamento da pesquisa: (i) duplicatas; (ii) tipo de documento, onde foram admitidos apenas artigos e artigos de revisão; (iii) período temporal, na qual foram excluídas as pesquisas apresentadas em 2023, e desse modo tomou-se o período de 2002 a 2022 – referente aos últimos 21 anos completos; (iv) idioma, incluindo apenas artigos em inglês; (v) afinamento por meio de palavras-chave e leitura de resumos, verificando a pertinência ao trabalho e a (vi) leitura integral dos artigos, incluindo aos que contribuem para a pesquisa.

Para a construção das métricas bibliométricas foram consideradas as fases de (i) a (iv) para que se identificasse os temas mais relevantes, autores e pesquisas periféricas aos tópicos mais relevantes. Para a construção da revisão considerou-se o refino da pesquisa por meio dos critérios (v) e (vi).

Figura 5.1 – Fluxograma da evolução e refino da pesquisa e seleção de trabalhos.



Fonte: Os autores (2023).

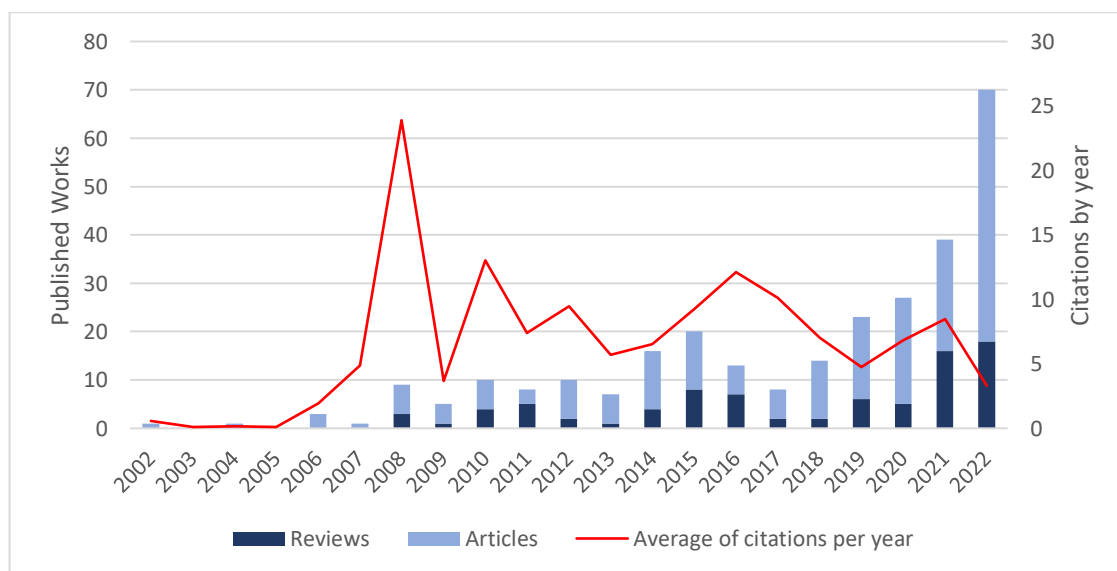
Por fim, os trabalhos que atenderam aos critérios de inclusão foram mantidos na amostra e são discutidos na seção de Resultados. Após as 6 etapas de seleção, a amostra final contou com 49 artigos. A tabulação, conexão e síntese de dados foram feitas por meio de planilhas eletrônicas do “MS Excel”, do Pacote “R” combinado com a biblioteca “Bibliometrix” e “Biblioshiny”. Considerou-se o conjunto de metadados da amostra, em destaque: títulos, tipo de documento, ano de publicação, país de publicação, instituição participante, área temática, palavras-chave, número de citações e periódicos, bem como autores e rede cooperação.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Publicações e estruturas de citação

A evolução temporal das publicações para a produção de hidrogênio a partir da digestão anaeróbica mostra, conforme a Figura 5.2, um crescimento do interesse científico acerca da temática. A partir de 2017 se observa um aumento nas publicações em relação ao ano anterior. A média de citações por ano é maior no ano de 2008, ano de maior relevância em publicações. Uma possível justificativa para o aumento das citações neste ano, foi o trabalho dos pesquisadores ao acelerar a busca acadêmica por alternativas para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis na economia global, dado a crise econômica global de 2007-2008, como relatado por Zhang, Yu e Wang, (2009). No ano posterior a média de citações cai abruptamente e permanece instável até o fim dos anos analisados.

Figura 5.2 – Evolução temporal dos trabalhos publicados.



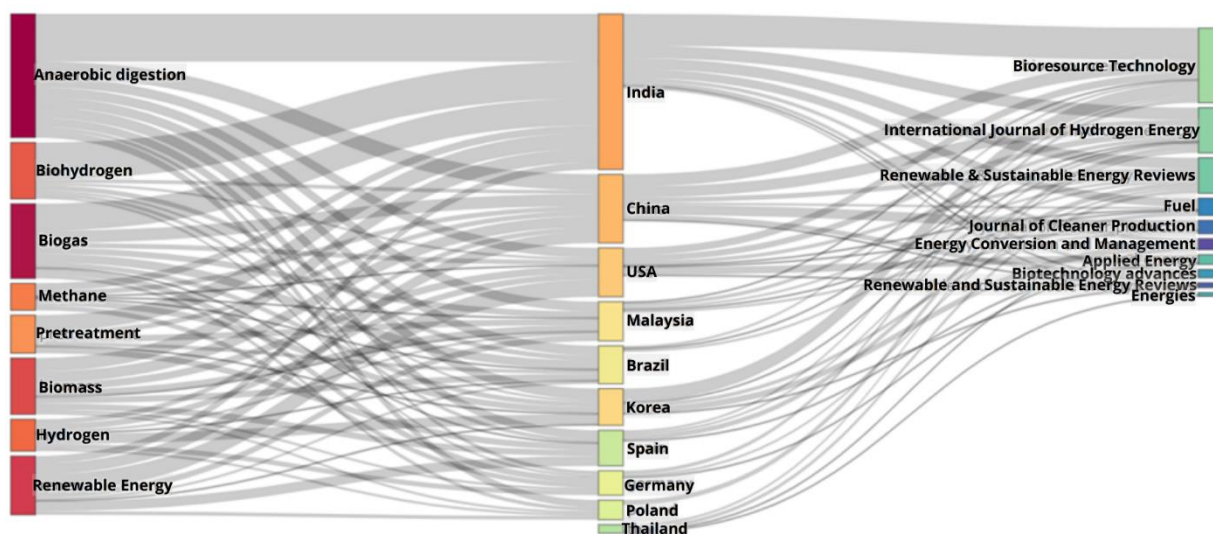
Fonte: Os autores, 2023.

Ao longo dos 21 anos analisados, verificou-se que apenas a partir do ano de 2014 houve um número de publicações superior a 10 trabalhos. O ano de 2002, início da amostra, registrou 1 publicação de artigo original. A proporção na amostra entre revisões e artigos no ano de 2022 é de 26%. O ano de 2022 tem o maior número de trabalhos publicados, 70, sendo 18 revisões e 52 artigos originais. A crescente nas publicações evidencia o aumento do interesse da comunidade científica acerca do tema estudado.

5.3.2 Países e regiões influentes

A Figura 5.3 apresenta o Diagrama de Sankey com as palavras-chave, países e periódicos. Como pode ser observado, o tópico “digestão anaeróbia” apareceu em 9 dos 10 países presentes na amostra, com exceção da Tailândia. O tópico “Biogás” e “Energia renovável” são o segundo e terceiro tópico de maior incidência respectivamente. A Índia e China lideram como os países produtores de trabalhos. Na amostra, os trabalhos indianos operam em todos os tópicos, majoritariamente em digestão anaeróbia, bio-hidrogênio e biogás. Também se observa que o Periódico *Bioresource Technology* aporta consideráveis porções das publicações indianas e coreanas. A China e Estados Unidos possuem publicações em periódicos difusos.

Figura 5.3 – Diagrama de Sankey relacionando Palavras-chave, País e Periódico

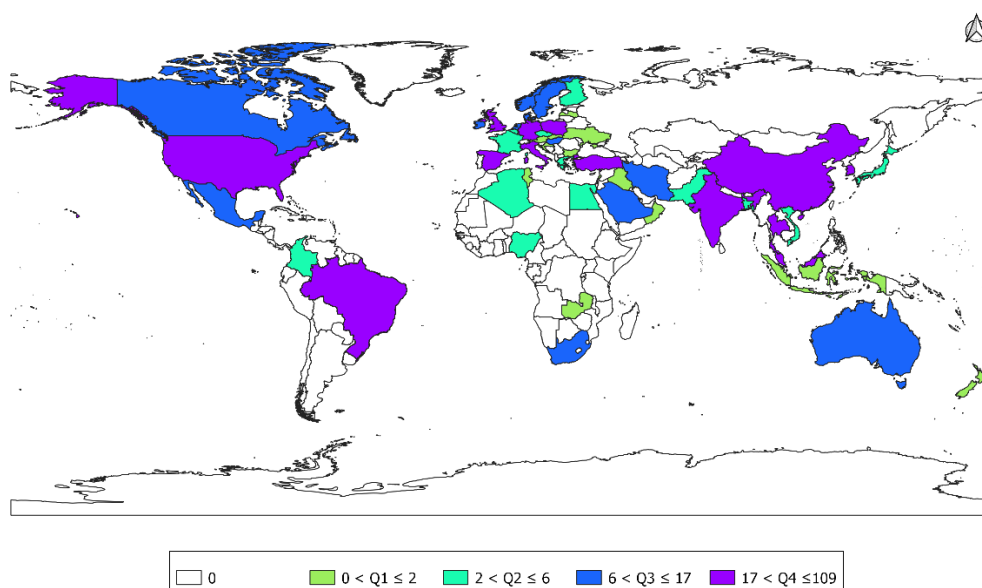


Fonte: Os autores (2023).

A Figura 5.4 apresenta a distribuição espacial das publicações em quartis. Ao todo, 53 países participaram das publicações analisadas na amostra. No Quartil 1(Q1), com até 2 publicações estiveram a Áustria, Bulgária, Croácia, Indonésia, Iraque, Letônia, Líbano, Ilhas

Maurício, Nova Zelândia, Oman, Eslovaca, Tunísia, Ucrânia e Zâmbia. No Quartil 2 (Q2), de 3 a 6 publicações, estiveram a Argélia, Bangladesh, Bélgica, Colômbia, República Tcheca, Egito, Finlândia, França, Grécia, Japão, Nigéria, Paquistão e Vietnã. No Quartil 3 (Q3), entre 7 e 17 publicações, estiveram a Austrália, Canadá, Dinamarca, Hungria, Irã, Irlanda, México, Noruega, Normandia, Arábia Saudita, Singapura, África do Sul e Suíça. Por fim, no Quartil 4 (Q4), estão o Brasil, com 22 publicações; China, com 77 publicações; Alemanha e Índia, com 109 publicações; Itália, Malásia, Polônia, Coreia do Sul, Espanha, Tailândia, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos da América. Os trabalhos até aqui contabilizados não receberam o filtro V e VI.

Figura 5.4 - Distribuição espacial, por países, em quartis, da quantidade de publicações científicas.



Fonte: Os autores (2023).

5.3.3 Análise de mapeamento científico

Nesta seção é analisada a rede de cooperação dos autores, fontes (periódicos) mais citados, bem como a rede de palavras-chave, com objetivo de encontrar padrões neste campo emergente de pesquisa e detectar possíveis caminhos para pesquisas futuras.

A partir do software R Studio foi possível elencar os 10 trabalhos mais citados, conforme a Tabela 5.1. Observa-se que o trabalho de WARD AJ, publicado em 2008 na revista *Bioresource Technology*, é o mais citado, 1.114 citações e uma Taxa de citação (TC) anual de

69,63; o trabalho de revisão aborda a otimização de técnicas para a digestão anaeróbia de recursos agrícolas. A correspondência é da *School of Chemistry, University of Wales – Bangor*, Reino Unido.

Tabela 5.1 – Os 10 Trabalhos mais citados da amostra bibliométrica

Nº	Trabalhos	DOI	Citações	TC anual	TC normalizado
1	WARD AJ, 2008, BIORESOUR TECHNOL	10.1016/j.biortech.2008.02.044	1114	69.63	2.91
2	DEMIREL B, 2008, REV ENVIRON SCI BIOTECHNOL	10.1007/s11157-008-9131-1	862	53.88	2.26
3	DEMIRBAS A, 2008, ENERGY CONV MANAG	10.1016/j.enconman.2008.02.020	751	46.94	1.96
4	BINOD P, 2010, BIORESOUR TECHNOL	10.1016/j.biortech.2009.10.079	677	48.36	3.71
5	GHIMIRE A, 2015, APPL ENERGY	10.1016/j.apenergy.2015.01.045	556	61.78	6.67
6	CANTRELL KB, 2008, BIORESOUR TECHNOL	10.1016/j.biortech.2008.02.061	475	29.69	1.24
7	MUSSGNUG JH, 2010, J BIOTECHNOL	10.1016/j.jbiotec.2010.07.030	446	31.86	2.45
8	LIM JS, 2012, RENEW SUST ENERG REV	10.1016/j.rser.2012.02.051	399	33.25	3.51
9	OLGUÍN EJ, 2012, BIOTECHNOL ADV	10.1016/j.biotechadv.2012.05.001	350	29.17	3.08
10	ROMERO-GUEIZA MS, 2016, RENEW SUST ENERG REV	10.1016/j.rser.2015.12.094	344	43.00	3.55

Fonte: Os autores (2023).

A Tabela 5.2 mostra os 10 periódicos de maior relevância quando considerada a quantidade de trabalhos publicados em que a amostra analisou. O periódico com mais trabalhos publicados é a *Bioresource Technology*. Possui atualmente um Cite Score de 20,8 e um Fator de impacto de 9,7. A sua área de pesquisa abrange biomassa, tratamento biológico de resíduos, bioenergia e Análise de Sistemas de Biorecursos.

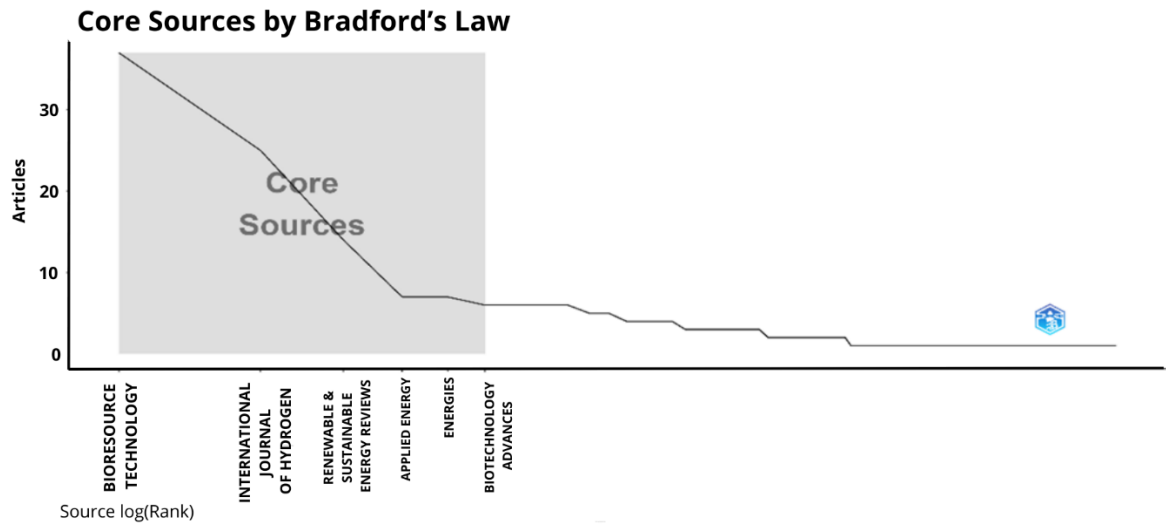
Tabela 5.2 – Os 10 periódicos mais relevantes a partir do número de trabalhos.

Nº	Periódicos	Trabalhos publicados
1	BIORESOURCE TECHNOLOGY	37
2	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	25
3	RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	14
4	APPLIED ENERGY	7
5	ENERGIES	7
6	BIOTECHNOLOGY ADVANCES	6
7	FUEL	6
8	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	6
9	RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	6
10	ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	5

Fonte: Os autores (2023).

O Núcleo de revistas mais importantes ocorreu pela lei de Bradford, Figura 5.5, que apontou a Bioresource Technology; International Journal of Hydrogen Energy; Renewable & Sustainable Energy Reviews; Applied Energy; Energies e Biotechnology Advances como os principais periódicos da área. A Tabela 5.2 já listava os periódicos dentre os dez mais relevantes quanto ao número de publicações.

Figura 5.5 – Núcleo de Periódicos a partir da Lei de Bradford.



Fonte: Os autores (2023).

Na Tabela 5.3 elenca-se os 10 autores com mais relevância quando observado a quantidade de trabalhos publicados. Os autores são: Irini Angelidaki, Technical University of Denmark; Alissara Reungsang, Khon Kaen University; Paul A. Scherer, Hamburg University of Applied Sciences; Yifeng Zhang, Technical University of Denmark. Possuem 6 trabalhos publicados cada.

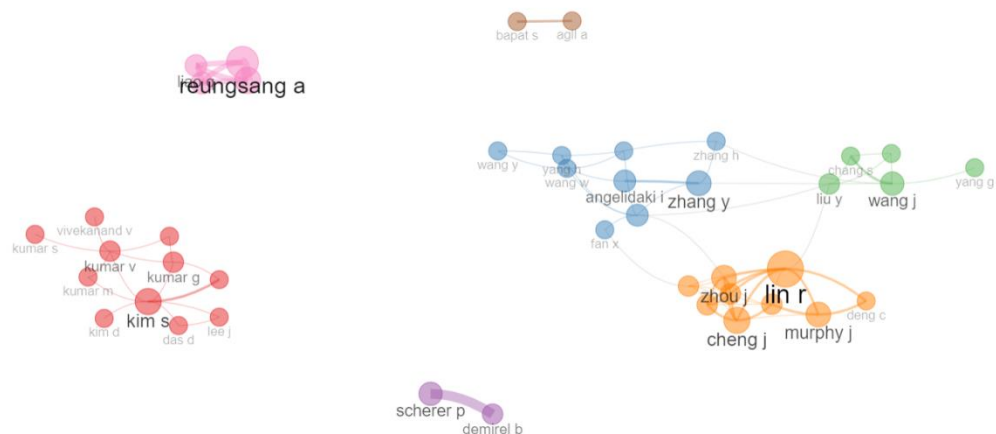
Tabela 5.3 – Os 10 autores mais relevantes da amostra

Autores	Artigos publicados	Artigos fracionados
ANGELIDAKI I	6	1.19
REUNGSANG A	6	1.57
SCHERER P	6	2.17
ZHANG Y	6	0.78
DEMIREL B	5	2.50
KIM S	5	0.98
KUMAR G	5	1.08
LIN R	5	0.78
MURPHY J	5	1.31
WANG J	5	1.45

Fonte: Os autores (2023).

O Mapa de interação entre os autores, Figura 5.6, mostra as redes de cooperação e coautoria formada ao longo dos trabalhos pesquisados. Observa-se que os autores formaram núcleo de cooperação no entorno de alguns autores de maior relevância, com maior número de trabalhos publicados. Alissara Reungsang; Sang Hyun Kim, da Konkuk University; e Paul Scherer, se mantiveram em conglomerados mais isolados, sem cooperação direta com os outros núcleos. Os Núcleos de Yifeng Zhang, Richen Lin, da University College Cork, e Jingyuan Wang, School of Civil and Environmental Engineering de Singapore City, mantiveram cooperação formando uma rede entre os núcleos.

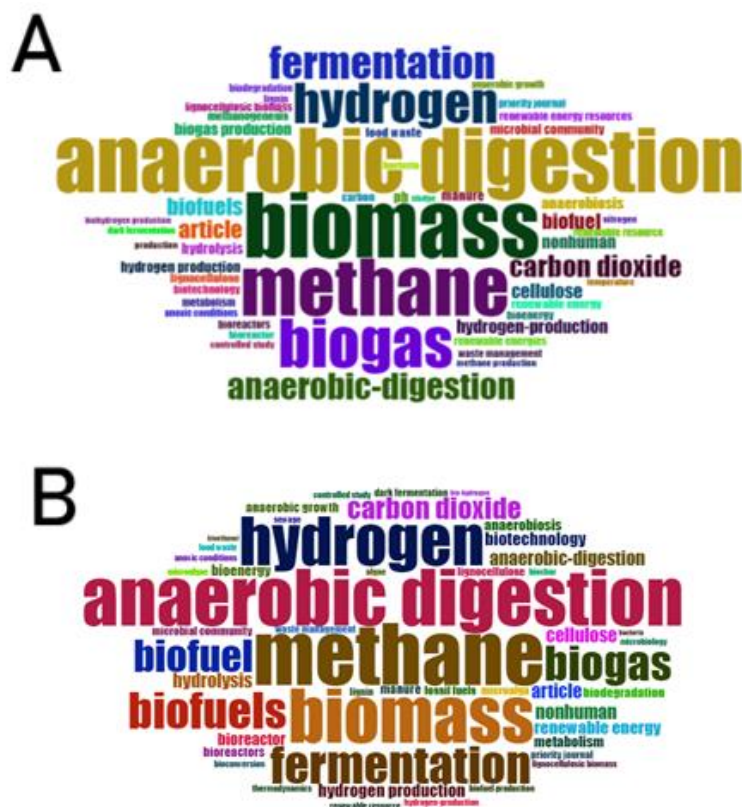
Figura 5.6 – Mapa de colaboração na rede autores.



Fonte: Os autores (2023).

A Figura 5.7 apresenta as nuvens de palavras da amostra bibliométrica, a preponderância dos termos “anaerobic digestion”, seguidos de “biomass”, “methane”, “biogas”, “Hydrogen” e “fermentation”, na nuvem A. Após a aplicação dos filtros V e VI a nuvem de palavras ganhou a formatação B, dando mais especificidade para as discussões temáticas.

Figura 5.7 – Nuvens de palavras



Fonte: O autor (2023).

5.4 DISCUSSÃO

5.4.1 Bioenergia e Bio-hidrogênio

O hidrogênio produzido por processos biológicos, o bio-hidrogênio, emite menos carbono e demanda menos energia, quando comparado ao hidrogênio produzido a partir do petróleo, pelos processos de reforma a vapor, gaseificação do carvão e eletrólise da água. As tecnologias renováveis de produção de bio-hidrogênio têm potencial de se tornarem competitivas em custo, pois utilizam matéria-prima de baixo custo como resíduos orgânicos municipais, agrícolas, industriais e águas residuárias (Kern *et al.*, 2016)

O bio-hidrogênio pode ser produzido por microrganismos autotróficos e heterotróficos, nas conversões autotróficas, a energia solar é convertida em hidrogênio por meio de microrganismos fotossintéticos como microalgas, protistas e bactérias fotossintéticas. Sob condições heterotróficas, os substratos orgânicos são transformados em compostos mais simples com a produção de hidrogênio molecular. As conversões heterotróficas podem ser por meio da fotofermentação, que depende da luz solar, ou por meio da fermentação escura, em condições anaeróbias, convertendo carboidratos em bio-hidrogênio (Ghimire *et al.*, 2015).

A busca por alternativas aos combustíveis convencionais e uma maior densidade energética em fontes da biomassa e hidrogênio motivaram o estudo de Jürgensen *et al.* (2015) que avaliou a viabilidade da reforma do biogás a partir de reações descritas pela equação de Sabatier:



O estudo indicou, por meio de simulações e experimentos, que a utilização do processo de Sabatier em uma tecnologia de reator único é possível aproveitar o biogás para obtenção de eletricidade ou biocombustíveis com potencial para substituir o GNV, onde a conversão de hidrogênio não é total.

No trabalho de Kern *et al.* (2016), buscando uma eficiência em escala comercial de reatores de biodigestão fez simulações e experimentos utilizando substrato de silagem de milho, centeio, esterco bovino e aviário, que indicaram uma correlação positiva entre a formação de hidrogênio no processo de digestão anaeróbia, hidrogenasse total, e a atividade metabólica, medida pela produção de metano.

Arizzi *et al.*, (2016) investigaram a produção de bio-hidrogênio e biometano a partir de diferentes amostras de compostagem e concluíram que os resíduos de compostagem sem qualquer tratamento já produzem H_2 e CH_4 , todavia, quando combinado com outras biomassas podem resultar em maiores índices de produção. A produção de gases é diretamente afetada pela qualidade da água presente no processo, devendo ser experimentado o uso de águas residuárias e efluentes. O material decomposto pode servir como inóculo para biorrefinarias, ou ainda como biofertilizantes, reduzindo o uso de fertilizantes sintéticos e os custos para empreendimentos de biotecnologia.

Conforme apresentado no trabalho de revisão de Lu e Ren, (2016), células de eletrólise microbiana, combinadas a sistemas de digestão anaeróbia podem produzir 98% de CH_4 . As células a combustível, com diferentes tecnologias podem ser alimentadas por sistemas de digestão anaeróbia, fermentação e outros caminhos de via biológica em alternativa aos combustíveis fosseis (Archer, S.A.; Steinberger-Wilckens, 2018).

Guan *et al.* (2015) investigaram a viabilidade de células de combustível alimentadas por biomassa por meio da Digestão Anaeróbia (DA) e Gaseificação (G). Os resultados mostraram que a obtenção de um gás rico em hidrogênio é viável em ambas, onde a DA se mostrou mais

eficiente em sistemas que demandem mais energia que calor e a G, o contrário. O sistema com DA gera mais eletricidade e com uma menor taxa de emissão de CO₂ por unidade de solo.

No trabalho de Archer and Steinberger-Wilckens, (2018) foi identificado que a digestão anaeróbia se apresenta como via competitiva para obtenção de biogases combustíveis. A tecnologia de células de combustível de óxido sólido se mostra superiores por permitirem maior diversidade de gases. A DA e Gaseificação possuem maior rendimento e maior eficiência.

Segundo Xia; Cheng; Murphy (2016) os sistemas de biometanização já são bem compreendidos, mas por meio de processos de valorização, incremento e inovação pode-se melhorar o aproveitamento energético por meio da produção de hidrogênio, armazenamento da eletricidade excedente e crescimento de microalgas. No trabalho, são apontados três cenários, onde o primeiro indica que se a China coletar e beneficiar todos os resíduos (palha, esterco e restos de comida) com tecnologias convencionais de digestão anaeróbia podem levar a um potencial de cerca de 130% do combustível renovável de transporte, e se aplicados outros cenários de melhoramento como eletrólise e reforma do biogás com microalgas podem triplicar os resultados.

5.4.2 Obtenção de Biogases por meio de microalgas

Olguín, (2012), em trabalho de revisão aponta que sistemas baseados em microalgas e bactérias para o tratamento de águas residuais e para a produção de biocombustíveis e produtos químicos contribuem significativamente para a diminuição do custo na produção de biomassa de microalgas. O mesmo trabalho destaca que o tratamento de efluentes da pecuária em um sistema de microalgas-bactérias favorece a recuperação energética por meio dos biogases e a conversão elétrica; auxilia na redução da taxa de emissão de gases de efeito estufa; e incrementa na produção dos empreendimentos. Ainda, apresentam sistemas associados a Microalgas oleaginosas e a cianobactérias do gênero *Arthrospira*, para produção de diferentes biocombustíveis, como biodiesel e bio-hidrogênio, e outros subprodutos comercializáveis.

Segundo Lakaniemi *et al.*, (2013) a fermentação escura ou *Dark fermentation* da biomassa de microalgas com alto teor de carboidratos é termodinamicamente mais favorável comparada ao tratamento fotobiológico quando a pressão parcial de H₂ é baixa. A produção de H₂ pode ser estimulada sobre a produção de CH₄ com controle de pH e usando tempos de retenção hidráulica curtos, inibindo os consumidores de H₂ não formadores de esporos com

tratamento térmico ou adicionando inibidores metanogênicos específicos, como ácido 2-bromoetanossulfônico (BESA), acetileno ou clorofórmio.

A utilização de cianobactérias como recurso bioenergético é difícil devido ao custo e ao consumo de energia da colheita de biomassa de microalgas. Para tal o estudo de Chen *et al.* (2014) investigou o desenvolvimento de um sistema auto floculante com a espécie *Anabaena*. Observaram um aumento na produção fotobiológica de H₂ nos heterocistos de cianobactérias filamentosas. Houve também uma recuperação de 91,71% da biomassa microalgal acumulada do meio líquido, biodigerida e convertida em biogás. Evidenciaram que por meio deste arranjo acoplado de produção fotobiológica de H₂ e digestão anaeróbica, foi alcançada uma alta taxa eficiência de conversão de energia da energia solar em bioenergia com valores de 3,79%.

Milledge; Heaven, (2014) pontuam que a produção de hidrogênio por cianobactérias é conhecida desde o final do século XIX, onde Gaffon é geralmente creditado pelo primeiro estudo científico de bio-hidrogênio de microalgas na pesquisa sobre *Scenedesmus* no final dos anos 1930 e início dos anos 1940. Os autores também apontam que a inibição do Oxigênio e a baixa da taxa de conversão da energia solar, 0,05%, são desafios a serem superados para que se viabilize a comercialização desse energético.

Os rendimentos estequiométricos de hidrogênio por fermentação escuram dependem do conteúdo de monossacarídeos e glicerol na biomassa das microalgas. O rendimento pode ser aumentado entre 50 e 70% tendo o pré-tratamento adequado. A matéria-prima necessária para a fermentação e produção de hidrogênio poder ser obtida a partir da (1) biomassa de algas residuais cultivada naturalmente (proliferação de algas), (2) biomassa de algas cultivada em águas residuais ou gases de combustão de usinas termelétricas e (3) algas residuais da biomassa após extração de lipídios e componentes valiosos (Xia *et al.*, 2015).

A fermentação escura se apresenta também como forma de pré-tratamento, no caso da biomassa microalgal. Então, em uma segunda etapa, como forma de superar o baixo rendimento bio-hidrogênio gerado pelas bactérias anaeróbicas que fermentam o hidrogênio, se dá a fotofermentação, onde as bactérias fotossintéticas convertem o substrato orgânico da biomassa de algas em bio-hidrogênio por meio de bactérias usando luz como fonte de energia (Kaloudas; Pavlova; Penchovsky, 2021).

Segundo Rincón-Pérez *et al.* (2020) as microalgas são uma alternativa ideal de biomassa por maior capacidade de fixação de CO₂, taxas de crescimento mais rápidas quando comparadas a biomassa vegetal, além do fato do cultivo prescindir terras aráveis. Bem como, aproveitar os seus subprodutos como pigmentos, proteínas, lipídeos e hidrocarbonetos. Os resultados do

estudo de Rincón-Pérez *et al.*, (2020) observaram que o pré-tratamento termoquímico para solubilização da biomassa microalgal (*Scenedesmus obtusiusculus*) é altamente eficaz para a melhoria da produção de metano e hidrogênio. Os hidrolisados de microalgas produziram 48 NmL de H₂/g SV e 296 NmL de CH₄/g SV, o que representa rendimentos de hidrogênio e metano 1,7 e 1,3 vezes maiores, respectivamente, do que as microalgas brutas.

Há três métodos de bioconversão de microalgas em biocombustível, como a digestão anaeróbia, a Síntese de álcool e a produção fotobiológica de H₂. As algas têm um teor de água que favorece a biodigestão húmida, todavia os digestores de curto prazo são desvantagens associadas ao elevado teor de humidade. Outra questão é a vulnerabilidade as variáveis ambientais como sazonalidade da produção de conteúdo nutricional e clima. O hidrogênio biológico produzido por microalgas tem potencial para ser um vetor de energia sustentável, renovável e limpa. A síntese de H₂ foi melhorada em co-culturas de *Chlamydomonas* devido a um aumento no teor de amido, uma diminuição na evolução líquida de O₂, uma redução na absorção de ácido acético pelas algas, trocas de metabólitos e o uso de intensidades de luz mais elevadas com produção de H₂ (Javed *et al.*, 2022).

Para a digestão anaeróbia de microalgas ser eficiente na produção de biogás devem ser cumpridos os seguintes requisitos como: condições climáticas favoráveis; obtenção de rendimentos equivalentes a 3% de eficiência fotossintética (25 g/m²•dia); fontes de energia incorporadas de baixo custo de CO₂ e nutrientes provenientes de gases de combustão e águas residuais; digestão mesofílica; conversão adequada do carbono orgânico em biogás C₆₀%; um floculante orgânico de baixa concentração e fácil digestão; minimização do bombeamento de suspensão diluída de microalgas. A biomassa de microalgas, apesar dos desafios tecnológicos, tem demonstrado o potencial para a produção de vários biocombustíveis, como o bio-hidrogênio (Milledge; Heaven, 2014).

5.4.3 Produção de Biogás e Bio-hidrogênio por meio da biomassa lignocelulósica

Devido à dificuldade da degradação da lignocelulose através da fermentação anaeróbia, Qu *et al.*, (2014) investigaram os efeitos da polaridade e da microtensão em substratos ricos em lignocelulose (esterco bovino). Os resultados de estudo identificaram que a produção de biogás atingiu 0,1748 L/g a -250mV, correspondendo a 58,3% de conversão de matéria-prima. O estudo concluiu que a eficácia da fermentação de eletrodo único, com a aplicação de

microvoltagens catódicas sendo o teste de maior sucesso, com taxa de produção média de metano em 4,47 mL/g ao dia.

Mutschlechner *et al.* (2015) foi estudado o pré-tratamento biológico com o produtor de um complexo grupo de enzimas, a *Trichoderma Viride*, que degrada a biomassa celulósica com eficiência e contribui com a biocenose ao aumentar a disponibilidade de nutrientes. Observaram que um aumento de até três vezes no rendimento da produção de metano das amostras. Concluíram que o pré-tratamento com a *T. Viride* é técnica promissora para pré-tratar biomassa lignocelulósica e assim para melhorar a produção de biogás.

A partir do trabalho de revisão de Okolie *et al.* (2021), se introduz que para as operações de produção de biogases a partir da digestão anaeróbica de lignocelulose se faz necessário um pH neutro, ao passo que ao longo de 3 semanas há o ajuste dos microrganismos às mudanças no substrato e temperatura. Recomendaram um tempo médio de retenção de 10 e 15 dias. Outro aspecto importante pontuado pelos autores é a relação C/N, que se extremamente alta ou baixa afetam a produção total de ácidos graxos, amônia e biogás. Ainda segundo Okolie *et al.* (2021), a eletrolise fotovoltaica tem sido explorada como alternativa renovável para a produção de hidrogênio. No entanto, o processo em larga escala está limitado a inconsistência na radiação solar, à redução da densidade da energia solar e aos materiais de alto custo dos eletrodos.

Segundo Wijeyekoon and Vaidya, (2021) existem diferenças significativas nos rendimentos de CH₄ por meio da Digestão anaeróbica no estado sólido. A revisão apresentada pelos autores citou-se os experimentos de Mirmohamadsadeghi *et al*, 2010; Mirahmadi *et al*, 2010; Matsakas *et al*, 2015 e Martínez-Gutiérrez, 2018. Foram elencadas a madeira macia (Pinho), a madeira semi-macia (Choupo) e a madeira dura (Baga). A madeira dura não tratada e tratada produziu rendimentos de metano mais elevados que a madeira macia. Tal comportamento se deve pela mistura contida na madeira dura de unidades Guaiacil e siringil, e pela presença majoritária de unidades guaiacil na lignina da madeira macia. Os autores pontuaram que a utilização de co-substratos pode melhorar o rendimento devido o sinergismo no processo de biodigestão.

No que tange a produção de hidrogênio, Wijeyekoon and Vaidya, (2021) introduziram que a fermentação escura é semelhante a fase da fermentação acidogenica da digestão anaeróbica, porém realizada na ausência de luz. Estabeleceram também que a produção de bio-hidrogênio a partir da celulose, hemicelulose e amido, sem a necessidade de fotoenergia e com espaço reduzido, torna a fermentação escura 340 vezes mais barato que a via fotossintética.

Sarkar *et al.*, (2022) avaliaram a produção de hidrogênio e outros produtos bioquímicos a partir de serragem de bétula pré-tratada com organossolo (SB). Identificou-se que a fermentação acidogênicas (FA) de SB resultou na produção 121,4 mL/g ·SV de H₂. Bem como, 17,8 g/L de ácidos carboxílicos de cadeia curta e 2,64 g/L de cadeia média. Quando estimada a integração com a DA em uma estrutura de biorrefinaria, a produção de biometano poderia ser de 246 mL/gSV a partir da SB restante da FA. A integração do BioH₂ com o BioCH₄ em diferentes momentos da digestão mostrou a formação de 8 a 14 L de gás (*Hythane*) com potencial energético de 8 a 9,08 kJ/g·SV.

5.4.4 Biogás e Bio-hidrogênio por meio da agropecuária e indústrias

Para a produção de biogás, biocombustíveis, bioquímicos diversos e bio-hidrogênio é necessário estudar e analisar o comportamento da biomassa durante o processo da conversão energética.

Park *et al.* (2015) estudaram combinações nos parâmetros (pH, temperatura, concentração) da digestão anaeróbia da biomassa da palha de arroz, visando estimar a melhor condição para produção de ácidos graxos voláteis (AGV). Os resultados mostraram uma concentração máxima de AGV de 12,37 g/L a 39,23 °C, 52,85 g/L de arroz palha a um pH 10. Também foi identificado o perfil bacteriano: como a família *Burkholderiaceae*, maior parte da população nos ensaios 2, 3, 5 e 6. As bactérias foram detectadas em reatores para produção de hidrogênio por digestão anaeróbica. No ensaio 2 detectaram o grupo *thermotogaceae*, que é um anaeróbio termofílico, e no ensaio 3 o *synergistaceae*, que é um anaeróbio produtor de biogás/hidrogênio. Identificaram também os principais produtos da fermentação da celulose, o hidrogênio, CO₂, etanol e o ácido acético com *C. cellulosi*, e o ácido butírico em produtos com *C. thermopalmarium*.

No estudo de Baêta *et al.* (2016) foi estimada o potencial de recuperação energética através da produção de metano e hidrogênio por meio da digestão anaeróbia do bagaço de cana-de-açúcar em reator de dois estágios. Consideraram que a etapa acidogênica atuou na hidrolisação e biodesintoxicação do hidrolisado de hemicelulose (HH), biomassa a ser digerida, melhorando os parâmetros cinéticos e potencializando a produção de metano na etapa metanogênica. A estimativa da energia combinada da combustão de ambos os biogases (H₂ e CH₄) acumulada durante o processo de dois estágios da digestão anaeróbica do HH gerado foi capaz de produzir uma energia líquida de 3,15 MJ/kg bagaço em peso seco.

Em uma abordagem mais teórica, Wall *et al.* (2017) sugeriram três cenários: o primeiro considera a produção de biogás por meio de microalgas e gaseificação do digerido sólido e o licor aplicado a culturas lenhosas para gaseificação. O segundo cenário ilustra que a energia para o gás poderia ser acoplada à gaseificação através da utilização de oxigênio proveniente da eletrólise, enquanto o hidrogênio proveniente da eletrólise poderia ser utilizado para atualizar o biogás por meio da metanização biológica ex-situ. O terceiro cenário é uma combinação dos dois, permitindo o crescimento natural de algas durante o dia e a tendência de haver excedente de eletricidade durante a noite.

Nakashima *et al.* (2020) fizeram uma avaliação ambiental e exergoeconômica ao estudar a conversão do bagaço da cana-de-açúcar e da vinhaça em eletricidade, metano e hidrogênio em 5 cenários. Os resultados indicaram que no melhor cenário, a produção de biocombustíveis a partir de resíduos de cana-de-açúcar aumentaram em 38-52% a quantidade de serviços de transporte em comparação com o caso base. Para os casos em que o beneficiamento de resíduos é empregado, a produção de metano fornece mais produtos ao mercado (52,4–58,6 MW) com custos unitários de exergia menores e emissões específicas de CO₂ para a fase de transformação (20–260% inferiores à eletricidade e ao hidrogênio). No entanto, a coprodução de hidrogênio e eletricidade pode atingir melhores indicadores técnicos e ambientais considerando a fase de utilização final (60-322% inferior ao biometano) devido à maior eficiência na conversão de combustível em serviço de transporte. Além disso, estima-se que a produção de hidrogênio oferece receitas operacionais mais elevadas (2.706–2.889 EUR/h).

Verbeeck *et al.*, (2021) avaliaram o potencial de produção de aditivos proteicos sustentáveis de forma descentralizada através do acoplamento da digestão anaeróbica e da produção de proteína microbiana usando bactérias metanotróficas e hidrogenotróficas em um biorreator na fazenda. O caso da produção de biometano para injeção na rede e da atualização do CO₂ com hidrogênio eletrolítico em proteína microbiana por meio de bactérias oxidantes de hidrogênio também foi considerado menos atrativo aos atuais preços de produção de hidrogênio renovável. Atualmente, os custos de produção de hidrogênio através da eletrólise PEM, incluindo CAPEX e OPEX, estão estimados em 4400 €/t H₂ (com base em um preço de eletricidade de 44 €/MWh). Os futuros custos nivelados previstos para a produção de hidrogênio foram fixados em 2600 €/tonelada H₂.

Malolan *et al.* (2021) apresentaram um estudo experimental da digestão anaeróbica de esterco bovino, esterco de galinha e algas obtida de águas residuárias. Monitoraram o efeito do

pH, da proporção de matéria-prima, tempo de retenção e relação C/N na produção de biogás. O rendimento máximo de metano e hidrogênio foi de 68% (30º dia) e 29% (10º dia) para proporção de 2:1:2, respectivamente. O digerido possuía nitrogênio (1,7%), fosfato (0,8%) e potássio (0,4%), respectivamente.

Os substratos utilizados durante a produção de bio-hidrogênio com ferramentas de bioprocessamento apropriadas devem ser carentes de nitrogênio e sólidos ricos em carboidratos. Na revisão apresentada por Duan *et al.* (2021) estes listaram alguns casos: Mohanakrishna (2010), onde produziram hidrogênio a partir de resíduos vegetais e com suplementação de esgoto apresentaram um aumento de até 55%. Da mesma forma, Yao *et al.* (2018) exploraram a produção de hidrogênio a partir de folhas de macieira por pirólise de micro-ondas, o maior poder calorífico (HHV) das folhas de macieira é de 18,80 MJ/kg, o biocarvão das folhas atingiu cerca de 25,94 MJ/kg. Tenca *et al.* (2011) adotaram uma estratégia diferente para alcançar a produção máxima de hidrogênio sem controle externo do pH, co-fermentaram resíduos vegetais utilizando conteúdo rico em álcalis, esterco de porco, a fim de contornar mudanças de pH externo. Lukitawasa *et al.* (2019) e Dong *et al.* (2009) utilizou resíduos produzidos nas indústrias de processamento de batata para aumentar a produção de bio-hidrogênio de 15% para 55%. Lu *et al.* (2016) estudaram a possibilidade de produção de bio-hidrogênio com energia renovável derivado de resíduos de maçãs podres com bactérias fotossintéticas e obtiveram o rendimento máximo de hidrogênio de $111,85 \pm 1$ mL H₂/g ST.

Noorollahi *et al.* (2021) há um interessante instrumento para nortear políticas públicas para a agricultura, as mudanças climáticas e para as energias renováveis. Investigaram a produção agrícola em várias províncias do Irã o que revelou um potencial significativo para a produção de bioenergia neste setor. O potencial de bioetanol, biodiesel e biogás foram, respectivamente, de $2,932 \times 10^6$ m³; $4,4 \times 10^5$ toneladas e $2,65 \times 10^9$ m³, o potencial de bio-hidrogênio é de $6,6 \times 10^4$ toneladas.

5.4.5 Resíduos periurbanos: um caminho para a bioenergia nos centros urbanos.

A codigestão de capim ou silagem com esterco de vaca é uma boa abordagem para a produção de hidrogênio e metano por meio da digestão anaeróbia em dois estágios. O rendimento de hidrogênio e metano máximos foram de 554 mL H₂/L e 27,71 mL H₂/g-SV, obtidos a partir da codigestão da silagem com esterco de vaca por *C. butyricum* TISTR 1032, indicando que *C. butyricum* TISTR 1032 melhorou a produção de H₂ e CH₄. O rendimento

energético da fermentação em dois estágios da codigestão de capim com esterco de vaca e silagem com esterco de vaca foi de 480,27 e 204,70 MJ/g-SV adicionados, respectivamente (Prapinagsorn; Sittijunda; Reungsang, 2017).

No estudo de Yang and Wang, (2017) foi apontado que por meio da co-fermentação do lodo de esgoto com folhas de choupo cruas, resíduos de flores e azevém aumentaram a produção de hidrogênio e reduziram o tempo de latência da fermentação do digestato. O rendimento de H₂ para fermentação de lodo de esgoto (monodigestão) aumentou de 11,2 mL/g SV para 20,8, 32,0 e 51,7 mL/g-SV adicionado por co-fermentação com folhas de choupo, resíduos de flores e azevém, respectivamente. A eficiência de conversão de carboidratos foi visivelmente melhorada com a adição dos resíduos florestais.

Além dos resíduos de poda, observamos que de maneira geral, a conversão da fração biogênica dos RSU em energia tende a resolver o problema da gestão de resíduos, além de oferecer geração de energia de forma sustentável e pode ser denominada como “resíduos renováveis”. As políticas de produção dos biocombustíveis precisam ser redefinidas de acordo com o cenário de mercado prevalecente. Também se faz necessário melhorar o conhecimento dos fatores técnicos de recuperação de recursos, das emissões da conversão em combustíveis, da qualidade do combustível, da economia de custos dos biocombustíveis provenientes de RSU, do ciclo de vida e impactos ambientais (incluindo carbono e GEE) (Dabe *et al.*, 2019).

Os RSU e de forma mais específica, a parcela de resíduos orgânicos advindos das cozinhas que são produzidos diariamente em uma quantidade significativa, podem ser usados para a produção de bio-hidrogênio por microrganismos fermentativos sob condições otimizadas. Segundo Srivastava *et al.* (2021) a fermentação desses substratos para produção de hidrogênio verde deve ser um imperativo, ao atenuar o problema dos resíduos urbanos e ao agregar valor a biomassa gerada.

5.4.6 Novas Perspectivas para o Bio-hidrogênio

A transformação dos resíduos em energia não é uma inovação, porém uma nova concepção de cadeia produtiva em arranjos bioindustriais é uma solução criativa. O conceito “Waste-to-energy” é utilizado no trabalho de Kaur *et al.*, (2020), que investigaram a produção de biocombustíveis a partir dos resíduos da colheita de amêndoas, mais especificamente as cascas, por meio de diferentes bioprocessos. Analisaram três rotas: a primeira observou a produção de *hythano* através da digestão anaeróbica em dois estágios (TSAD); a segunda,

analisou a fermentação etanólica; e a terceira observou a produção acoplada de etanol e *hythano*. A terceira rota, produção acoplada de etanol e *hythano*, levou ao aumento da degradação do substrato (91,3%) e maior eficiência de conversão de carbono (75,1%), resultando em maior recuperação de energia (22.156,6 kJ/kg CODr) em comparação com a primeira rota (13.573,6 kJ/kg CODr). A pirolise pode ser uma estratégia para aumentar a viabilidade econômica do processo ao produzir biocarvão a partir das cascas.

Segundo Sun *et al.* (2020), em trabalho de revisão relatou que “biochar” – biocarvão – é utilizado para correção do solo e mais recentemente aplicado em processos de digestão anaeróbia. A partir do bioprocessamento microbiano e da catálise em refinaria de biomassa e síntese de biodiesel trouxeram novos conhecimentos para o uso do *biochar*. A adição de biocarvão aumenta a produção cumulativa de H₂ em quatro vezes em uma co-cultura de *Enterobacter aerogenes* e *Escherichia coli* na digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. As razões para o aumento na produção de H₂ foram atribuídas a concentração adequada de Fe₂₊, que melhorou a atividade da hidrogenase; A superfície do *biochar* e estruturas porosas que forneceram suporte para a formação de biofilme; 3) compostos presentes no *biochar* utilizados como fonte de nutrientes; e 4) o tamponamento de pH a partir do *biochar* forneceu um nível de pH adequado (entre 5,0 e 7,0) para o crescimento celular e produção de H₂.

Kant Bhatia *et al.*, (2021) relataram que a presença de vários oligoelementos no *biochar* pode complementar nutrientes aos micróbios e substituir a exigência de adição mineral adicional durante a fermentação. Ainda, os autores afirmaram que as propriedades do *biochar*, como elevada área superficial, porosidade, grupos funcionais, forneceram um meio adequado para a produção de biofilme microbiano necessário para a produção de eletricidade em célula a combustível microbiana. Observaram ainda que há necessidade de conhecimento e compreensão com base na caracterização experimental e definir um processo que possa ajudar a selecionar biomassa e condições operacionais para produzir um biochar das propriedades desejadas. Afirmaram que o uso de inteligência artificial baseada na relação entre a composição da biomassa, propriedades do biochar, estrutura e grupos funcionais pode auxiliar no processo de triagem de materiais para diversas aplicações.

Na Digestão Anaeróbia de estágio único, os agentes metanogênicos metabolizam rapidamente H₂ e ácido acético, resultando principalmente em CH₄ e CO₂. No entanto, a segregação da digestão anaeróbia em estágios independentes permite o uso do efluente em estágios subsequentes. A partir do trabalho de revisão de Patel *et al.* (2021) evidencia-se que a fermentação escura seguida pelo processo de geração de H₂ fotofermentado pode ajudar a

combater a barreira do alvo estequiometricamente alcançável de 4 mol H₂/mol. Isso permite a produção de 8,3 mol H₂/mol a partir de biomassa algal. A fotofermentação escura efetivamente alcançou um rendimento de H₂ 62,5 vezes maior a partir de resíduos como biomassa de algas, soro de queijo, sorgo doce e águas residuais sintéticas. Uma população microbiana definida composta por *Bacillus*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Rhodopseudomonas* e *Rhodobacter spp* podem ser efetivamente exploradas para alcançar um maior rendimento de H₂ a partir de biorresíduos. A biomassa algal pertencente a *Laminaria*, *Arthospira* e *Chlorella spp* está emergindo como potenciais fontes primárias renováveis como alternativas aos combustíveis fósseis. Para um progresso rápido, a otimização desses processos biológicos é necessária. Os fatores críticos incluem i) pré-tratamento de rações, ii) uso de nanomateriais, iii) rações e bactérias bem definidas, Engenharia de micróbios industrialmente robustos e iv) projetos eficientes de reatores.

A partir do trabalho de revisão de Mishra *et al.*, (2021) é possível observar o entendimento do tratamento dos resíduos pecuários para soluções ambientais e geração de energia por autores diversos. Os autores, citados na revisão supracitada, Khoshnevisan *et al.* (2021), DiazV'azquez *et al.* (2020) e Dong *et al.* (2019) pontuaram estratégias sustentáveis que são exigidas para contornar os *trade-offs* entre indústrias baseadas na pecuária, como a poluição ambiental, demanda energética alternativa, e emissão de GEE a partir de esterco, ao considerar o aumento da população pecuária e a consequente crescimento da produção de esterco animal. O estrume obtido de animais leiteiros e suínos é considerado principalmente para estabilizar o processo de produção de biogás, fornecendo os nutrientes e outros oligoelementos necessários para o crescimento de micróbios na DA. Ainda acrescentaram que a compostagem é mais econômica, e a DA pode ser utilizada para obtenção de energia de baixo carbono e limpa instigando a transição energética e produção de fertilizantes orgânicos.

Ainda na revisão apresentada por Mishra *et al.*, (2021), os biogases obtidos a partir de resíduos da pecuária, mais especificamente o estrume, por meio da DA é uma reserva energética multiuso que pode ser facilmente transformada em calor, energia elétrica e combustível, sejam em países emergentes e desenvolvidos. Na mesma revisão, pontuaram que os esterco bovinos, suínos, búfalos e galinhas tem o maior potencial, estimados em de 2700 a 3800 TWh de energia globalmente e, 250-370 bilhões m³ quando refinado para biometano, que atendem à demanda de gás natural para Índia e China juntas.

Ebrahimian *et al.* (2022) apresentaram o estado da arte quanto ao beneficiamento de resíduos da casca de batata, propondo o conceito de biorefinarias que começaria com a

extração de compostos inibitórios, seguida pela conversão biológica de resíduos remanescentes de casca de batata em biocombustíveis, biopolímeros ou bioquímicos e, finalmente, a conversão termoquímica de resíduos de casca de batata em biocarvão, bioóleo ou biossorventes, o que maximiza o valor derivado dos resíduos de casca de batata. A biomassa da casca de batata oportuniza que resíduos ou subprodutos industriais ou alimentares se transformem em energia.

Abdelqader *et al.*, (2022) observaram que há cinco meios para a produção de Bio-hidrogênio a partir da digestão de biorresíduos, mais especificamente resíduos alimentares. São elencados a fotoremediação; fermentação escura; sistema híbrido; biofotólise e eletrolise microbiana. Os autores objetivaram o enriquecimento das atividades de fotobioestimulação produtoras de hidrogênio usando irradiação a laser acoplado ao sistema de digestão anaeróbia. Os resultados mostraram que o inóculo irradiado com laser vermelho de hélio-neônio aumentou a produção de bio-hidrogênio em 1,2 vezes a partir de resíduos alimentares através do processo de fotofermentação.

No trabalho de Radhakrishnan *et al.* (2021) foi estudado um sistema de codigestão de esterco de aves diluído e biomassa algal, onde se apresentou uma melhor produtividade de H₂. O esterco solúvel de aves com efluentes ricos em amido pode ser utilizado, mas requer maiores estudos, ao observar o balanço de nitrogênio e o uso do digestato como adubo. Houve uma maior eficiência global de energia usando um processo de duas etapas ou dois estágios nos reatores de digestão.

Na revisão realizada por Bosu & Rajamohan, (2022) estes apresentaram uma discussão sobre as aplicações de vários nanomateriais para melhorar a produção de bio-hidrogênio. Verificaram que uma redução significativa nos custos com tecnologia na produção de Bio-hidrogênio pode ser obtida da utilização de nanomateriais. Os melhores rendimentos de bio-H₂ obtidos na presença de várias nanopartículas de óxidos metálicos como: AgO (2,44 mol H₂/ mol glicose), NiO (1,92 mol H₂/ mol glicose) e diferentes óxidos de ferro como γ -Fe₂O₃ (1,43 mol H₂/ mol malato), Fe₂O₃ (3,57 mol H₂/ sacarose) e Hematita (2,33 mol H₂/glicose). Os autores pontuam que pesquisas futuras devem se concentrar em investigar o efeito benéfico dos nanomateriais no controle da lise celular, bem como, estudos toxicológicos de nanopartículas em solução fermentadas são necessários para a compreensão de impacto ambiental.

A codigestão e o acoplamento de estruturas e reatores para aumentar a eficiência de conversão energética da biomassa é um método eficaz, embora novas configurações e novas formas de pré-tratamento e beneficiamento sejam trazidas a comunidade científica a todo instante. As novas composições para biocombustíveis já admitem o *Bio-Hythane*.

Segundo Ghosh & Kar (2022) este biocombustível, o bio-hitano, é uma combinação de duas etapas de dois biogases diferentes que contém 10–25% H₂ e 70–90% CH₄. E por ser produzido a partir de resíduos alimentares domésticos e lodos de esgoto industrial como substratos, tem sido considerado como o "combustível do futuro". Os autores justificaram esse título ao reduzir a enorme quantidade de resíduos alimentares e industriais gerados em todo o globo se os utilizarmos a biomassa para a produção de bio-hitano. Ainda afirmaram que esse combustível proporciona mais eficiência na combustão do que os combustíveis fósseis convencionais além de possuir aplicações industriais diversas.

A integração da geração de energia renovável com a bioeconomia circular nas biorefinarias se apresenta como uma nova tendência para resolução de empasses ambientais, gestão de recursos e produção de bens e serviços.

Desse modo, Kabir *et al.*, (2022) pontuaram que a digestão anaeróbia em dois estágios fornece um ambiente de crescimento otimizado para reatores anaeróbios ao maximizar a eficiência microbiana. Em consequência, a cogeração de bio-hitano tem um maior potencial de recuperação de energia do que outros processos de conversão. Os autores relatam que a biomassa de microalgas apresenta maior potencial de produção de bio-hitano tanto para bio-H₂ em fermentação escura quanto para bio-CH₄ na digestão anaeróbia; A co-digestão de lodo de microalgas e águas residuais aumentaria a relação C/N da mistura para o nível ótimo, que é otimizado para aumentar a produção de bio-hitano. Recomenda-se também a cultura de algas e bactérias para remoção de CO₂ da mistura de bio-hitano, ocasionando a descarbonização e acréscimo de valor ao purificar o bio-hitano. Neste estudo observa-se um conceito de desperdício zero por meio de digestão anaeróbia em dois estágios de lodo de microalgas-águas residuais, liquefação hidrotermica de digerido sólido e purificação de bio-hitano usando co-cultura algas-bactérias.

5.5 CONCLUSÃO

Com a análise da literatura dos últimos 21 anos dado a amostra bibliométrica obtida, observou-se a mudança, adaptação e evolução das pesquisas na grande área da bioenergia, sobretudo quanto aos temas de maior interesse com o passar dos anos e as ênfases. Nos anos iniciais se observa a preponderância da busca pela eficiência energética e aproveitamento do biogás e com a evolução das pesquisas e tecnologia passa a se buscar o hidrogênio o hidrogênio de baixa emissão (ou baixo carbono) como vetor energético na transição energética. Também

se observa o encontro de finalidades entorno dos temas da economia circular, mudanças climáticas, biorrefinarias, além das energias renováveis.

Em aspectos bibliométricos, se evidenciou a tendencia de crescimento das pesquisas na área ao longo dos anos, de forma crescente desde 2017. Com o aumento de artigos com inovações práticas, metodológicas e tecnológicas, trazendo diferentes arranjos tecnológicos e de biomassas.

A partir da literatura é possível entender que a integração de diferentes métodos de tratamento ou beneficiamento de biomassa podem aumentar a eficácia da produção dos biogases, sejam o metano ou hidrogênio obtidos em bioprocessos. A eficácia se dá quando compreendida a sinergia dos diferentes grupos microbianos e as diferentes configurações de reatores e materiais a fim de reduzir custos e perdas. O acoplamento em cascata, tal qual o modelo de biorrefinaria se faz cada vez mais necessário para a construção de fontes de recursos energéticos visando a economia circular, a renovabilidade da matriz e a segurança energética. Outro aspecto importante é a utilização de resíduos para a produção de bioenergia, ou mais especificamente o biohidrogênio, melhorando a qualidade ambiental e mitigando a emissão de gases de efeito estufa, em sincronia com os esforços do mundo em combater a emergência climática.

5.6 REFERÊNCIAS

- Abdelqader, A. A., Abdelsalam, E. M., Attia, Y. A., Moselhy, M. A., Ali, A. S., Arisha, A. H., & Samer, M. (2022). Application of helium-neon red laser for increasing biohydrogen production from anaerobic digestion of biowastes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(1), 11–17. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.65932.3423>
- Amin, F. R., Khalid, H., Zhang, H., Rahman, S., Zhang, R., Liu, G., & Chen, C. (2017). Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. In *AMB Express* (Vol. 7, Issue 1). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>
- Archer, S. A., & Steinberger-Wilckens, R. (2018). Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23178–23192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.161>
- Arizzi, M., Morra, S., Pugliese, M., Gullino, M. L., Gilardi, G., & Valetti, F. (2016). Biohydrogen and biomethane production sustained by untreated matrices and alternative application of compost waste. *Waste Management*, 56, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.039>
- Baêta, B. E. L., Lima, D. R. S., Filho, J. G. B., Adarme, O. F. H., Gurgel, L. V. A., & Aquino, S. F. D. (2016). Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysates by two-stage anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*, 218, 436–446. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.113>
- Bosu, S., & Rajamohan, N. (2022). Nanotechnology approach for enhancement in biohydrogen production- review on applications of nanocatalyst and life cycle assessment. *Fuel*, 323, 124351. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124351>
- Chen, M., Li, J., Zhang, L., Chang, S., Liu, C., Wang, J., & Li, S. (2014). Auto-flotation of heterocyst enables the efficient production of renewable energy in cyanobacteria. *Scientific Reports*, 4(1), 3998. <https://doi.org/10.1038/srep03998>
- Dabe, S. J., Prasad, P. J., Vaidya, A. N., & Purohit, H. J. (2019). Technological pathways for bioenergy generation from municipal solid waste: Renewable energy option. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(2), 654–671. <https://doi.org/10.1002/ep.12981>
- Daraei, M., Campana, P.-E., Avelin, A., Jurasz, J., & Thorin, E. (2021). Impacts of integrating pyrolysis with existing CHP plants and onsite renewable-based hydrogen supply on the system flexibility. *Energy Conversion and Management*, 243, 114407. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114407>
- Deep Singh, A., Gajera, B., & Sarma, A. K. (2022). Appraising the availability of biomass residues in India and their bioenergy potential. *Waste Management*, 152, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.001>
- Duan, Y., Mehariya, S., Kumar, A., Singh, E., Yang, J., Kumar, S., Li, H., & Kumar Awasthi, M. (2021). Apple orchard waste recycling and valorization of valuable product-A review. *Bioengineered*, 12(1), 476–495. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1872905>
- Ebrahimian, F., Denayer, J. F. M., & Karimi, K. (2022). Potato peel waste biorefinery for the sustainable production of biofuels, bioplastics, and biosorbents. *Bioresource Technology*, 360, 127609. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127609>

- Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trably, E., Escudie, R., Lens, P. N. L., & Esposito, G. (2015). A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. *Applied Energy*, 144, 73–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.045>
- Ghosh, S., & Kar, D. (2022). Biohythane: a Potential Biofuel of the Future. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04291-y>
- Guan, T., Chutichai, B., Alvfors, P., & Arpornwichanop, A. (2015). Biomass-fuelled PEMFC systems: Evaluation of two conversion paths relevant for different raw materials. *Energy Conversion and Management*, 106, 1183–1191. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.055>
- Ishaq, H., Dincer, I., & Crawford, C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238–26264. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>
- Javed, M. U., Mukhtar, H., Hayat, M. T., Rashid, U., Mumtaz, M. W., & Ngamcharussrivichai, C. (2022). Sustainable processing of algal biomass for a comprehensive biorefinery. *Journal of Biotechnology*, 352, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.05.009>
- Jürgensen, L., Ehimen, E. A., Born, J., & Holm-Nielsen, J. B. (2015). Dynamic biogas upgrading based on the Sabatier process: Thermodynamic and dynamic process simulation. *Bioresource Technology*, 178, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.069>
- Kabir, S. Bin, Khalekuzzaman, M., Hossain, N., Jamal, M., Alam, M. A., & Abomohra, A. E.-F. (2022). Progress in biohythane production from microalgae-wastewater sludge co-digestion: An integrated biorefinery approach. *Biotechnology Advances*, 57, 107933. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107933>
- Kaloudas, D., Pavlova, N., & Penchovsky, R. (2021). Lignocellulose, algal biomass, biofuels and biohydrogen: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 2809–2824. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01213-y>
- Kant Bhatia, S., Palai, A. K., Kumar, A., Kant Bhatia, R., Kumar Patel, A., Kumar Thakur, V., & Yang, Y.-H. (2021). Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. *Bioresource Technology*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125644>
- Kaur, M., Kumar, M., Sachdeva, S., & Puri, S. K. (2020). An efficient multiphase bioprocess for enhancing the renewable energy production from almond shells. *Energy Conversion and Management*, 203, 112235. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112235>
- Kern, T., Theiss, J., Röske, K., & Rother, M. (2016). Assessment of hydrogen metabolism in commercial anaerobic digesters. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(10), 4699–4710. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7436-5>
- Kunatsa, T., & Xia, X. (2022). A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement. *Bioresource Technology*, 344, 126311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126311>
- Lakaniemi, A.-M., Tuovinen, O. H., & Puhakka, J. A. (2013). Anaerobic conversion of microalgal biomass to sustainable energy carriers - A review. *Bioresource Technology*, 135, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.096>

- Lu, L., & Ren, Z. J. (2016). Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: A state of the art review. *Bioresource Technology*, 215, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.034>
- Majeed, M. T., Luni, T., & Tahir, T. (2022). Growing green through biomass energy consumption: the role of natural resource and globalization in a world economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 33657–33673. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18017-w>
- Malolan, R., Jayaraman, R. S., Adithya, S., Arun, J., Gopinath, K. P., SundarRajan, P., Nasif, O., Kim, W., & Govarthanan, M. (2021). Anaerobic digestate water for *Chlorella pyrenoidosa* cultivation and employed as co-substrate with cow dung and chicken manure for methane and hydrogen production: A closed loop approach. *Chemosphere*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128963>
- Milledge, J. J., & Heaven, S. (2014). Methods of energy extraction from microalgal biomass: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13(3), 301–320. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9339-1>
- Mishra, A., Kumar, M., Bolan, N. S., Kapley, A., Kumar, R., & Singh, L. (2021). Multidimensional approaches of biogas production and up-gradation: Opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125514>
- Mutschlechner, M., Illmer, P., & Wagner, A. O. (2015). Biological pre-treatment: Enhancing biogas production using the highly cellulolytic fungus *Trichoderma viride*. *Waste Management*, 43, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.011>
- Nakashima, R. N., Flórez-Orrego, D., Velásquez, H. I., & De Oliveira Junior, S. (2020). Sugarcane bagasse and vinasse conversion to electricity and biofuels: An exergoeconomic and environmental assessment. *International Journal of Exergy*, 33(1), 44–75. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2020.109623>
- Noorollahi, Y., Janalizadeh, H., Yousefi, H., & Jahangir, M. H. (2021). Biofuel for energy self-sufficiency in agricultural sector of Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101069. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101069>
- Okolie, J. A., Mukherjee, A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Next-generation biofuels and platform biochemicals from lignocellulosic biomass. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 14145–14169. <https://doi.org/10.1002/er.6697>
- Olguín, E. J. (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. *Biotechnology Advances*, 30(5), 1031–1046. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.05.001>
- Park, G. W., Seo, C., Jung, K., Chang, H. N., Kim, W., & Kim, Y.-C. (2015). A comprehensive study on volatile fatty acids production from rice straw coupled with microbial community analysis. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 38(6), 1157–1166. <https://doi.org/10.1007/s00449-015-1357-z>
- Patel, S. K. S., Das, D., Kim, S. C., Cho, B.-K., Kalia, V. C., & Lee, J.-K. (2021). Integrating strategies for sustainable conversion of waste biomass into dark-fermentative hydrogen and value-added products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111491>
- Prapinagsorn, W., Sittijunda, S., & Reungsang, A. (2017). Co-Digestion of Napier Grass and Its Silage with Cow Dung for Bio-Hydrogen and Methane Production by Two-Stage Anaerobic Digestion Process. *Energies*, 11(1), 47. <https://doi.org/10.3390/en11010047>

- Qu, G., Qiu, W., Liu, Y., Zhong, D., & Ning, P. (2014). Electropolar effects on anaerobic fermentation of lignocellulosic materials in novel single-electrode cells. *Bioresource Technology*, 159, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.052>
- Radhakrishnan, R., Banerjee, S., Banerjee, S., Singh, V., & Das, D. (2021). Sustainable approach for the treatment of poultry manure and starchy wastewater by integrating dark fermentation and microalgal cultivation. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(2), 790–803. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01173-z>
- Reed, J., Dailey, E., Fong, A., & Samuelsen, G. S. (2022). Time-phased geospatial siting analysis for renewable hydrogen production facilities under a billion-kilogram-scale build-out using California as an example. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(66), 28224–28243. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.179>
- Rincón-Pérez, J., Razo-Flores, E., Morales, M., Alatríste-Mondragón, F., & Celis, L. B. (2020). Improving the Biodegradability of *Scenedesmus obtusiusculus* by Thermochemical Pretreatment to Produce Hydrogen and Methane. *Bioenergy Research*, 13(2), 477–486. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10067-w>
- Sarkar, O., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2022). Organosolv pretreated birch sawdust for the production of green hydrogen and renewable chemicals in an integrated biorefinery approach. *Bioresource Technology*, 344, 126164. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126164>
- Srivastava, N., Srivastava, M., Abd_Allah, E. F., Singh, R., Hashem, A., & Gupta, V. K. (2021). Biohydrogen production using kitchen waste as the potential substrate: A sustainable approach. *Chemosphere*, 271, 129537. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129537>
- Sun, X., Atiyeh, H. K., Li, M., & Chen, Y. (2020). Biochar facilitated bioprocessing and biorefinery for productions of biofuel and chemicals: A review. *Bioresource Technology*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122252>
- Tembhare, S. P., Barai, D. P., & Bhanvase, B. A. (2022). Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 153). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111738>
- Thiruselvi, D., Kumar, P. S., Kumar, M. A., Lay, C. H., Aathika, S., Mani, Y., Jagadiswary, D., Dhanasekaran, A., Shanmugam, P., Sivanesan, S., & Show, P. L. (2021). A critical review on global trends in biogas scenario with its up-gradation techniques for fuel cell and future perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(31), 16734–16750. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.023>
- Verbeeck, K., De Vrieze, J., Pikaar, I., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2021). Assessing the potential for up-cycling recovered resources from anaerobic digestion through microbial protein production. *Microbial Biotechnology*, 14(3), 897–910. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13600>
- Wall, D. M., McDonagh, S., & Murphy, J. D. (2017). Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy. *Bioresource Technology*, 243, 1207–1215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.115>
- Wijeyekoon, S. L. J., & Vaidya, A. A. (2021). Woody biomass as a potential feedstock for fermentative gaseous biofuel production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(8). <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03102-6>

- Xia, A., Cheng, J., & Murphy, J. D. (2016). Innovation in biological production and upgrading of methane and hydrogen for use as gaseous transport biofuel. *Biotechnology Advances*, 34(5), 451–472. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.009>
- Xia, A., Cheng, J., Song, W., Su, H., Ding, L., Lin, R., Lu, H., Liu, J., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Fermentative hydrogen production using algal biomass as feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 209–230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.076>
- Yang, G., & Wang, J. (2017). Enhanced Hydrogen Production from Sewage Sludge by Co-fermentation with Forestry Wastes. *Energy & Fuels*, 31(9), 9633–9641. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02135>
- Zhang, X., Yu, L., & Wang, S. (2009). *The Impact of Financial Crisis of 2007-2008 on Crude Oil Price* (pp. 643–652). https://doi.org/10.1007/978-3-642-01973-9_72

5.7 APÊNDICE

Autores	Título do Artigo	Periódico
PARK G; SEO C; JUNG K; CHANG H; KIM W; KIM Y	A comprehensive study on volatile fatty acids production from rice straw coupled with microbial community analysis	Bioprocess And Biosystems Engineering
GHIMIRE A; FRUNZO L; PIROZZI F; TRABLY E; ESCUDIE R; LENS P; ESPOSITO G.	A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass process parameters and use of byproducts	Applied Energy
KAUR M; KUMAR M; SACHDEVA S; PURI S	An efficient multiphase bioprocess for enhancing the renewable energy production from almond shells	Energy Conversion And Management
REDWOOD M; OROZCO R; MAJEWSKI A; MACASKIE L	An integrated biohydrogen refinery synergy of photofermentation extractive fermentation and hydrothermal hydrolysis of food wastes	Bioresource Technology
LAKANIEMI A; TUOVINEN O; PUHAKKA J	Anaerobic conversion of microalgal biomass to sustainable energy carriers a review	Bioresource Technology
MALOLAN R; JAYARAMAN R; ADITHYA S; ARUN J; GOPINATH K; SUNDARRAJAN P; NASIF O; KIM W; GOVARTHANAN M	Anaerobic digestate water for chlorella pyrenoidosa cultivation and employed as cosubstrate with cow dung and chicken manure for methane and hydrogen production a closed loop approach	Chemosphere
DUAN Y; MEHARIYA S; KUMAR A; SINGH E; YANG J; KUMAR S; LI H; KUMAR A M	Apple orchard waste recycling and valorization of valuable products a review	Bioengineered
ABDELQADER A; ABDELSALAM E; ATTIA Y; MOSELHY M; ALI A; ARISHA A; SAMER M	Application of heliumneon red laser for increasing biohydrogen production from anaerobic digestion of biowastes	Egyptian Journal Of Chemistry
VERBEECK K; DE V J; PIKAAR I; VERSTRAETE W; RABAEY K	Assessing the potential for upcycling recovered resources from anaerobic digestion through microbial protein production	Microbial Biotechnology
KERN T; THEISS J; RÖSKE K; ROTHER M	Assessment of hydrogen metabolism in commercial anaerobic digesters	Applied Microbiology And Biotechnology
CHEN M; LI J; ZHANG L; CHANG S; LIU C; WANG J; LI S	Autoflotation of heterocyst enables the efficient production of renewable energy in cyanobacteria	Scientific Reports
SUN X; ATIYEH H; LI M; CHEN Y	Biochar facilitated bioprocessing and biorefinery for productions of biofuel and chemicals a review	Bioresource Technology
NOOROLLAHI Y; JANALIZADEH H; YOUSEFI M	Biofuel for energy selfsufficiency in agricultural sector of Iran	Sustainable Energy Technologies And Assessments
DEMIRBAS A	Biofuels sources biofuel policy biofuel economy and global biofuel projections	Energy Conversion And Management
ARIZZI M; MORRA S; PUGLIESE M; GULLINO M; GILARDI G; VALETTI F	Biohydrogen and biomethane production sustained by untreated matrices and alternative application of compost waste	Waste Management
SRIVASTAVA N; SRIVASTAVA M; ABD-ALLAH R; HASHEM A; GUPTA V	Biohydrogen production using kitchen waste as the potential substrate a sustainable approach	Chemosphere
GHOSH S; KAR D	Biohythane a potential biofuel of the future	Applied Biochemistry And Biotechnology
MUTSCHLECHNER M; ILLMER P; WAGNER A	Biological pretreatment enhancing biogas production using the highly cellulolytic fungus trichoderma viride	Waste Management

GUAN T; CHUTICHA B; ALVFORS P; ARPORNWICHANOP A	Biomassfuelled pemfc systems evaluation of two conversion paths relevant for different raw materials	Energy Conversion And Management
WALL D; MCDONAGH S; MURPHY J	Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy	Bioresource Technology
PRAPINAGSORN W; SITTIJUNDA S; REUNGSANG A	Codigestion of napier grass and its silage with cow dung for biohydrogen and methane production by twostage anaerobic digestion process	Energies
OLGUÍN E	Dual purpose microalgaebacteriabased systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery	Biotechnology Advances
JÜRGENSEN L; EHIMEN E; BORN J; HOLM-NIELSEN J	Dynamic biogas upgrading based on the sabatier process thermodynamic and dynamic process simulation	Bioresource Technology
QU G; QIU W; LIU Y; ZHONG D; NING P	Electropolar effects on anaerobic fermentation of lignocellulosic materials in novel singleelectrode cells	Bioresource Technology
YANG G; WANG J	Enhanced hydrogen production from sewage sludge by cofermentation with forestry wastes	Energy \& Fuels
BAÊTA B; LIMA D; FILHO J; ADARME O; GURGEL L; AQUINO S	Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysates by twostage anaerobic digestion process	Bioresource Technology
XIA A; CHENG J; SONG W; SU H; DING L; LIN R; LU H; LIU J; ZHOU J; CEN K	Fermentative hydrogen production using algal biomass as feedstock	Renewable And Sustainable Energy Reviews
MORRIS R; TALE V; MATHAI P; ZITOMER D; MAKI J	Gene abundance correlates with hydrogenotrophic methane production rates in fullscale anaerobic waste treatment systems	Letters In Applied Microbiology
RINCÓN-PÉREZ J; RAZO-FLORES E; MORALES M; ALATRISTE-MONDRAGÓN F; CELIS L	Improving the biodegradability of scenedesmus obtusiusculus by thermochemical pretreatment to produce hydrogen and methane	Bioenergy Research
XIA A; CHENG J; MURPHY J	Innovation in biological production and upgrading of methane and hydrogen for use as gaseous transport biofuel	Biotechnology Advances
PATEL S; DAS D; KIM S; CHO B; KALIA V; LEE J	Integrating strategies for sustainable conversion of waste biomass into darkfermentative hydrogen and valueadded products	Renewable And Sustainable Energy Reviews
KALOUDAS D; PAVLOVA N; PENCHOVSKY R	Lignocellulose algal biomass biofuels and biohydrogen a review	Environmental Chemistry Letters
MILLEDGE J; HEAVEN S	Methods of energy extraction from microalgal biomass a review	Reviews In Environmental Science And Bio-Technology
LU L; REN Z	Microbial electrolysis cells for waste biorefinery a state of the art review	Bioresource Technology
HNAIN A; COCKBURN L; LEFEBVRE D	Microbiological processes for waste conversion to bioenergy products approaches and directions	Environmental Reviews
MISHRA A; KUMAR M; BOLAN N; KAPLEY A; KUMAR R; SINGH L	Multidimensionais approaches of biogas production and upgradation opportunities and challenges	Bioresource Technology
BOSU S; RAJAMOHAN N	Nanotechnology approach for enhancement in biohydrogen productionreview on applications of nanocatalyst and life cycle assessment	Fuel
OKOLIE J; MUKHERJEE A; NANDA S; DALAI A; KOZINSKI J	Nextgeneration biofuels and platform biochemicals from lignocellulosic biomass	International Journal Of Energy Research

SARKAR O; ROVA U; CHRISTAKOPOULOS P; MATSAKAS L	Organosolv pretreated birch sawdust for the production of green hydrogen and renewable chemicals in an integrated biorefinery approach	Bioresource Technology
EBRAHIMIAN F; DENAYER J; KARIMI K	Potato peel waste biorefinery for the sustainable production of biofuels bioplastics and biosorbents	Bioresource Technology
KABIR S; KHALEKUZZAMAN M; HOSSAIN N; JAMAL M; ALAM M; ABOMOHRA A	Progress in biohythane production from microalgaewastewater sludge codigestion an integrated biorefinery approach	Biotechnology Advances
YUAN R; PU J; WU D; WU Q; HUHE T; CHEN Y	Research priorities and trends on bioenergy insights from bibliometric analysis	International Journal Of Environmental Research And Public Health
NAKASHIMA R; FLÓREZ-ORREGO D; VELÁSQUEZ H; DE O J S	Sugarcane bagasse and vinasse conversion to electricity and biofuels an exergoeconomic and environmental assessment	International Journal Of Exergy
RADHAKRISHNAN R; BANERJEE S; BANERJEE V; DAS D	Sustainable approach for the treatment of poultry manure and starchy wastewater by integrating dark fermentation and microalgal cultivation	Journal Of Material Cycles And Waste Management
JAVED M; MUKHTAR H; HAYAT M; RASHID U; MUMTAZ M; NGAMCHARUSSRIVICHAI C	Sustainable processing of algal biomass for a comprehensive biorefinery	Journal Of Biotechnology
ARCHER S; STEINBERGER-WILCKENS R	Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells	International Journal Of Hydrogen Energy
DABE S; PRASAD P; VAIDYA A; PUROHIT H	Technological pathways for bioenergy generation from municipal solid waste renewable energy option	Environmental Progress \& Sustainable Energy
KANT B S; PALAI A; KUMAR A; KANT B R; KUMAR P A; KUMAR T V; YANG Y	Trends in renewable energy production employing biomassbased biochar	Bioresource Technology
WIJEYEKOON S; VAIDYA A	Woody biomass as a potential feedstock for fermentative gaseous biofuel production	World Journal Of Microbiology And Biotechnology

6 ARTIGO 4: SIMULAÇÃO DO POTENCIAL BIOECONÔMICO E ENERGÉTICO DE DEJETOS ANIMAIS EM COMUNIDADES RURAIS.

RESUMO

A mudança do clima, pandemias, guerras e disputas regionais geram desequilíbrios socioeconômicos, ocasionando em aumento de inflação, perda de empregos, insegurança alimentar e escassez de recursos e energia, o que dificulta a manutenção da vida humana. Todavia, a sociedade moderna articula compromissos globais, que objetivam o desenvolvimento sustentável. Um dos meios para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável é a bioeconomia, novo tema, que visa a substituição dos recursos fósseis por recursos de base biológica e renovável – o que gera menos consumo de recursos, menos poluição e emissão de gases de efeito estufa. A transformação da matéria prima biológica, por meio da digestão anaeróbia, proporciona a geração de bioenergia na forma de biogás e eletricidade, como também oportuniza negócios bioeconômicos como o comércio de biofertilizantes e a venda de créditos de carbono. Nesse trabalho objetivou-se apresentar cenários para a viabilidade do tratamento da biomassa de dejetos animais e beneficiamento energético e observar oportunidades de negócios bioeconômicos em comunidades rurais. Para simular as potencialidades de cada cenário proposto mensurou-se a carga de efluentes, o potencial diário, a geração de energia elétrica; para a análise financeira estimou-se o Valor Presente Líquido (VPL) e o *Payback* descontado, além de observar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Além disso, foi estimado o potencial de valor agregado do comércio de biofertilizantes e do crédito de carbono. Os resultados mostraram que 1.621 suínos são suficientes a viabilidade técnica, financeira e ambiental do negócio. A simulação apresentou que esse rebanho tem o potencial de tratar 76,34 m³ de resíduos da pecuária; gerar 1,26 GWh/ano de energia elétrica, e de performar uma economia/venda potencial de R\$ 337.559,91 ao ano, com um *Payback* de 2 anos e 10 meses. Concluiu-se que a partir dessa pesquisa, o interesse em vocações bioeconomicas pode ser fomentado, bem como, pode apontar para oportunidades na agropecuária em arranjos tecnológicos em comunidades rurais, fortalecendo a economia local.

Palavras-chave: Energias Renováveis; Bioeconomia; Bioenergia; Biodigestão; Biogás.

ABSTRACT

Simulation of the bioeconomic and energy potential of animal waste in rural communities.

Climate change, pandemics, wars, and regional disputes generate economic imbalances, leading to increased inflation, job losses, food insecurity, and scarcity of resources and energy, which makes it difficult to sustain human life. However, society articulates global commitments, which aim at sustainable development. One of the means to achieve the Sustainable Development Goals is the bioeconomy, a new theme, which aims to replace fossil resources with bio-based and renewable resources – which generates less resource consumption, less pollution and less greenhouse gas emissions. The transformation of biological raw material, through anaerobic digestion, provides the generation of bioenergy in the form of biogas and electricity, as well as providing opportunities for bioeconomic businesses such as the trade of biofertilizers and the sale of carbon credits. The objective of this work was to present scenarios for the feasibility of the treatment of animal waste biomass and its energy processing, as well as to observe the opportunity for bioeconomic business in rural communities. To simulate the potential of each proposed scenario, the effluent load, the daily potential, the generation of electricity were measured; for the financial analysis, the Net Present Value (NPV) and the discounted Payback were estimated, in addition to observing the Minimum Attractiveness Rate (TMA) and the Internal Rate of Return (IRR). In addition, the value-added potential of biofertilizer trade and carbon credits was estimated. The results showed that 1,621 pigs are sufficient for the technical, financial and environmental viability of the business. The simulation showed that this herd has the potential to treat 76.34 m³ of livestock waste; generate 1.26 GWh/year of electricity, and to perform a potential saving/sale of R\$ 337,559.91 per year, with a Payback of 2 years and 10 months. It is concluded that from this research, the interest in bioeconomic vocations can be fostered, as well as can point to opportunities in agriculture in technological arrangements in rural communities, strengthening the local economy.

Keywords: Renewable Energies; Bioeconomy; Bioenergy; Biodigestion; Biogas.

6.1 INTRODUÇÃO

A exposição da economia global aos riscos e incertezas associadas as mudanças climáticas, eventos pandêmicos, conflitos regionais, ou disputas comerciais favorecem desequilíbrios macro e microeconômicos, e consequentemente, o aumento da inflação; a escassez de recursos, energia, fertilizantes; a insegurança alimentar, perda de empregos e pobreza – tais condições ameaçam a existência humana (Taron; Gebrezgabher, 2024).

Em resposta a necessidade de manutenção da sociedade é criado num esforço global o imperativo ético e social da adoção dos objetivos de desenvolvimento sustentável e o lançamento da Agenda 2030, cujo pano de fundo geral é a construção de um novo sistema econômico baseado na integração de conhecimentos para a utilização sustentável dos recursos biológicos, produtos e subprodutos, reduzindo a geração de resíduos e poluição, em busca da “descarbonização” da economia (Hidalgo; Martín-Marroquín; Corona, 2023).

Nesse contexto, o conceito de Bioeconomia Circular tornou-se o novo lema econômico para a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), ao substituir os recursos fósseis por recursos de base biológica para um amplo espectro de produtos, incluindo, calor, eletricidade, combustíveis, plásticos ou produtos químicos (Lubjuhn; Venghaus, 2024).

A bioeconomia pode ser entendida como um processo de transformação econômica, social e política, que utiliza inovações tecnológicas aplicadas com o objetivo de agregar valor à produtos e/ou serviços, principalmente ao local em que trabalha. Organizações, instituições e atores econômicos atuam de forma sinérgica para o desenvolvimento econômico, social, ambiental e cultural (Bentes; Benitz, 2024). Por meio de estratégias bioeconômicas, a produção animal pode ter impacto ambiental por produto reduzido. A intensificação das práticas de sustentabilidade na pecuária permite o atingimento de metas dentro do campo da zootecnia e dos objetivos globais na segurança alimentar (Fontanesi *et al.*, 2024).

O tratamento do esterco animal – biomassa de excrementos – tem um grande potencial por meio dos bioprocessos ou biorrefinarias que utilizam esta biomassa como matéria-prima, de agregar valor as principais atividades pecuárias geradoras de esterco e garantir modalidades sustentáveis de consumo e produção que permitam mitigar os efeitos causados pela atividade (Hoyos-Sebá *et al.*, 2024).

Segundo Freitas *et al.* (2024) a biodigestão anaeróbia pode ter uma menor emissão de carbono equivalente e ainda gerar créditos de carbono ao meio ambiente, ou seja uma

redução dos impactos negativos advindos da destinação e poluição inadequada de resíduos, observando que o tratamento biológico se apresenta como melhor opção quando comparado a destinação a aterros e incineração.

A pecuária também é um gerador de impactos ambientais negativos, desencadeados principalmente pelos dejetos animais. A suinocultura, em especial, vem crescendo no mercado, dado que a carne suína é mais barata que a carne bovina. Uma produção sustentável de proteína animal é realizada pela utilização de todos os recursos de forma natural (Gerona, 2024; RUDECK *et al.*, 2024). A suinocultura sustentável deve se concentrar no racionamento de água; uso dos insumos, tratamento dos dejetos até chegar no destino adequado e aproveitamento dos produtos oriundos dos processos tecnológicos de tratamento, por exemplo, o biogás e biofertilizante orgânico (Saviotti *et al.*, 2016).

Para apontar caminhos de descentralização e diversificação da matriz energética, propiciar uma solução bioeconômica e bioenergética, e ainda, fortalecer a pecuária local e o consumo de biofertilizantes procurou-se, neste trabalho, simular cenários de viabilidade técnica, econômica e ambiental para um arranjo tecnológico de tratamento da biomassa de dejetos suínos e o beneficiamento destes (comercialização de biofertilizantes e crédito de carbono).

6.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

6.2.1 Caracterização do estudo

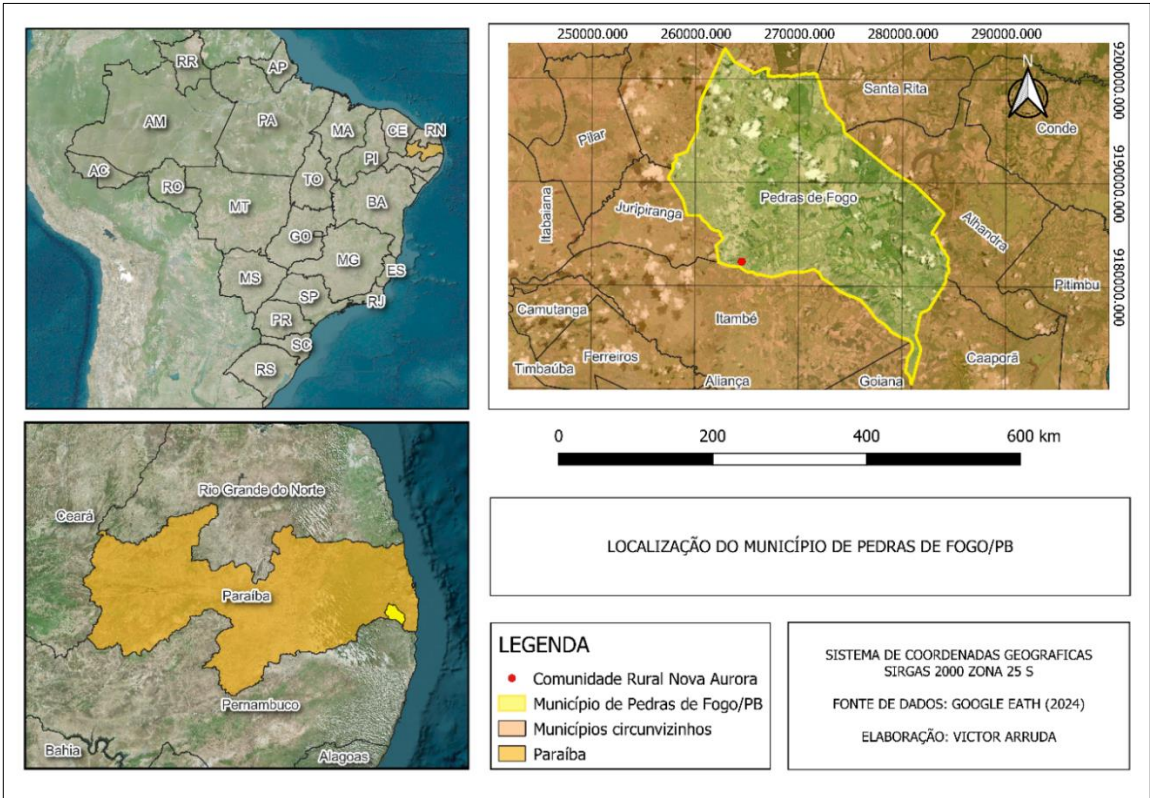
O estudo teve enfoque na zona rural do município de Pedras de Fogo-PB, na comunidade rural de Nova Aurora, localizada no entorno da coordenada 7°23'45.7"S 35°07'57.8"O, em região periurbana. O município de Pedras de Fogo foi escolhido para pesquisa e aplicação do desenvolvimento dos cenários de viabilidade, dado a localização estratégica no Litoral Sul da Paraíba, como mostra a Figura 6.1. A Zona Rural ocupa cerca de 99,6% dos 406,73 km² da área total. A população é estimada em 29.662 habitantes (IBGE, 2024a).

O município de Pedras de Fogo tem vocação agropecuária. No ano de 2022 o município obteve uma produção aproximada de 60 mil toneladas de abacaxi; 12 mil toneladas de mandioca e com destaque para a cana-de-açúcar, que majoritariamente compõe a produção, com mais de 1 milhão de toneladas em 2022 (IBGE, 2024b).

A pecuária do município se apresentou no ano de 2022 com um rebanho efetivo de 3965 bovinos, 1246 suínos e mais de 1 milhão de galináceos. O rebanho suíno quase dobrou

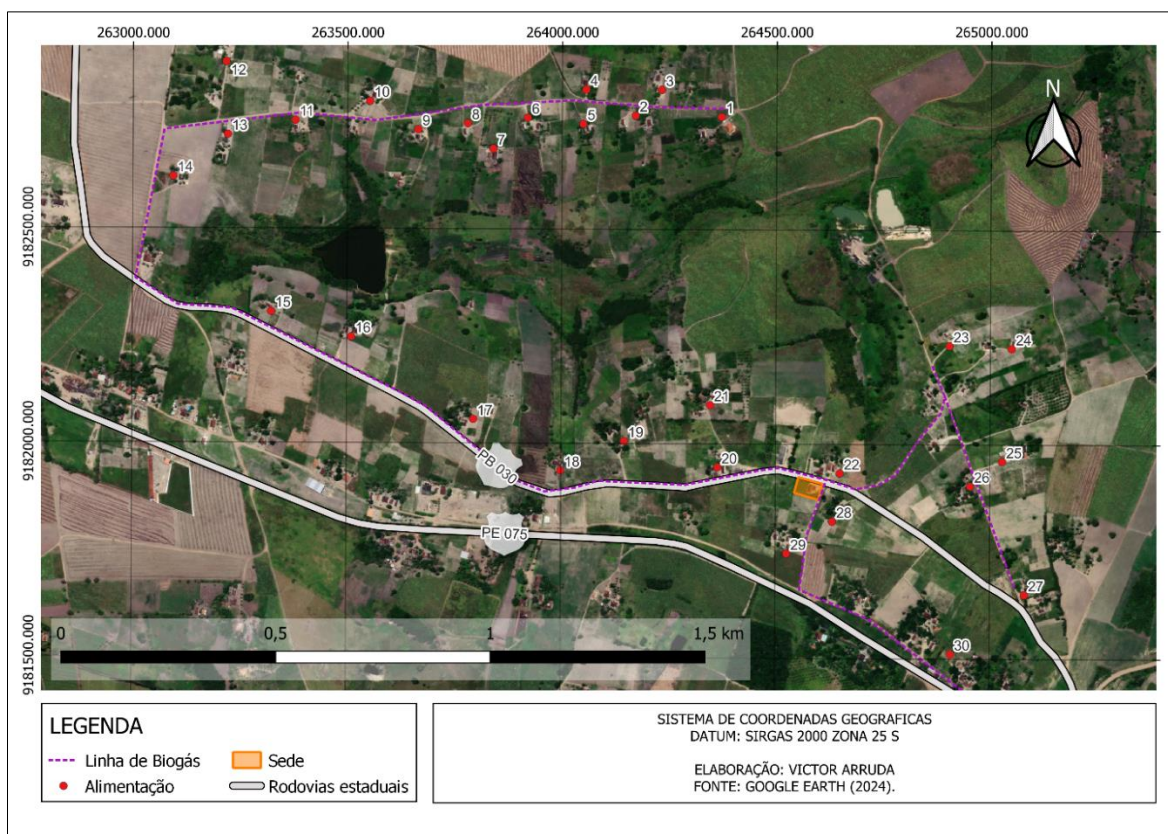
desde 2017 (IBGE, 2024c). A Figura 6.2 mostra a distribuição e localização de domicílios familiares com interesse em aderir um arranjo bioenergético com suínos.

Figura 6.1 - Mapa de Localização de Pedras de Fogo-PB



Fonte: O autor (2024).

Figura 6.2 - Mapa de localização de domicílios interessados ao arranjo bioenergético de suinocultura



Fonte: O autor (2024).

6.2.2 Plantel de animais

Todas as 30 unidades familiares/ domicílios possuem algum tipo de criação animal, atividade pecuária extensiva de subsistência ou para comercialização com pequena escala de produção. Para esse estudo foi considerado que cada família ou unidade familiar poderá contribuir com o sistema a ser analisado com, no mínimo, 30 cabeças de suínos cada. O rebanho suíno foi escolhido pela menor necessidade de espaço e maior taxa de sólidos voláteis (SV) comparado com outros rebanhos, aumentando a ciclagem dos resíduos para nutrientes e energia. Dessa forma, serão estimados os suínos na fase de engorda pesando de 25 a 120 kg em um ciclo produtivo de crescimento até terminação média de 90 a 105 dias (Lima, 2018).

Para os cenários estimados e analisados foi estabelecido um arranjo cooperativo de suinocultura e produção de bioenergia, considerando a agricultura familiar existente na região, com sede de atividades na Associação dos Trabalhadores Rurais de Nova Aurora.

6.2.3 Análise da Viabilidade e construção dos cenários

Foram propostos 3 cenários para avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental dos arranjos bioenergéticos propostos. Análise de ambos os cenários foi realizada a partir do levantamento dos investimentos necessários para a implantação dos projetos a serem arranjados em cada um dos aspectos analisados, bem como a vantagem obtida a cada incremento de oportunidade bioeconômica.

Em primeiro estimou-se o potencial de biogás de toda a biomassa dos dejetos animais disponíveis e produzidas nas unidades familiares; o transporte da biomassa até um biodigestor de alto rendimento e outros dispositivos necessários para beneficiamento do biogás. O biodigestor e o conjunto motor-gerador estarão localizados na sede da Associação dos trabalhadores rurais de Nova Aurora. Em ambos os cenários se considerou um único plantel a ser construído nas imediações da associação. Os cenários estudados foram:

- 1) Cenário 1 - Produção centralizada de energia elétrica;
- 2) Cenário 2 - Produção centralizada de energia elétrica e biofertilizante a partir dos dejetos suínos;
- 3) Cenário 3 - Produção centralizada de energia elétrica, biofertilizantes e venda de créditos de carbono.

6.2.4 Módulo 1 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS E DESTINAÇÃO: Cálculo da população e carga de efluentes/resíduos aproveitados/tratados para o beneficiamento escolhido.

Para determinar a produção da carga de efluente dos dejetos orgânicos dos suínos foi utilizada a metodologia adaptada do CIBIOGÁS para suínos, apresentada no Documento 196 da Embrapa Suínos e Aves (MITO *et al.*, 2018) . Foram observados parâmetros na literatura que foram convencionados como os valores adotados nas estimativas, conforme Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros adotados para o cálculo da produção potencial de biogás

Efluentes (L/dia/animal)	B ₀ (m ³ CH ₄ /kgSV)	SV (g/L)	%CH ₄
47.1	0.32	35.38	60

Fonte: adaptado de Lima (2018).

Inicialmente uma produção diária de dejetos suínos, ou seja, efluentes incluindo fezes, urina e água é de 120 L/dia (Embrapa, 2017). No entanto adotou-se uma produção de 47,1 L/dia por animal ao considerar um manejo com menor volume de água (Barros *et al.*, 2019). Também foram considerados na pesquisa, a capacidade máxima de produção de metano (B_0) a partir de determinada biomassa; e a quantidade de Sólidos voláteis (SV) para a pecuária de suínos de ciclo completo com dados não categorizados (Embrapa, 2017). A produção diária, e conseqüentemente, a produção anual foi obtida a partir da multiplicação da quantidade de animais, da carga de dejetos e do potencial energético atribuído, conforme Equação 6.1, adaptado de Mito *et al.* (2018).

$$PDD = N \cdot Pe \quad (6.1)$$

sendo,

PDD = Produção diária de dejetos (efluentes) suínos;

N = número de animais;

Pe = Carga diária de efluentes por animal ao dia.

Dado ao fator anual de permanência (FAP) se dar pela forma de manejo dos animais, e admitindo que o rebanho é estacionado no mesmo espaço todo o ano (FAP = 1,0) pode-se estimar a Produção anual de dejetos do rebanho suíno (PADS), conforme a Equação 2.

$$PADS = PDD \cdot 365 \cdot FAP \quad (6.2)$$

O potencial de biogás foi estimado multiplicando-se o PADS, o coeficiente de geração de biogás (B_0), e os SV apresentados na Tabela 6.1, conforme a Equação 6.3.

$$PM = B_0 \cdot SV \cdot PADS \quad (6.3)$$

onde, PM é a produção anual de metano, admitindo que esta produção representa 60% da composição dos biogases resultado da volatilização da biomassa dos dejetos suínos.

6.2.5 Módulo 2 - ESTRUTURA DE TRATAMENTO E BENEFICIAMENTO: Estimativa dos orgânicos transformados e bioprodutos potencialmente obtidos.

Produção de Eletricidade

Para o dimensionamento do conjunto motor-gerador, foram utilizados como parâmetros, o poder calorífico do biogás, 5136,46 kcal/Nm³ (Avellar, 2001); a eficiência do motor-gerador, 40% segundo o modelo utilizado como referência; a disponibilidade diária do combustível, a partir da quantidade de suínos; o tempo de funcionamento efetivo da planta de geração e o fator de potência.

Com os dados obtidos no módulo 1, quando da estimativa da produção de biogás, é possível estimar também o potencial teórico de produção de energia elétrica, conforme a Equação 6.4.

$$PTE = PCI \cdot PDD \quad (6.4)$$

Onde, PTE é o potencial teórico de produção de eletricidade, dado em kWh/dia; PCI é o poder calorífico inferior, dado em kWh/m³; e PDD é a produção diária de dejetos suínos.

E conseqüentemente pode-se determinar o potencial técnico produção de eletricidade (PTCE), onde se leva em consideração a eficiência global de conversão nas máquinas térmicas, calculado a partir da Equação 6.5.

$$PTCE = \frac{(PTE \cdot \eta)}{100} \quad (6.5)$$

onde PTCE (kWh/dia) é o Potencial técnico de produção de eletricidade; PTE (kWh/dia) é o Potencial teórico de produção de eletricidade e η (%) é a Eficiência do grupo motor-gerador. Ainda, por meio da Equação 6.6, foi calculado a potência elétrica da planta.

$$POT = \frac{PTCE}{HO \cdot \cos\phi} \quad (6.6)$$

sendo, POT (kVA) é Potência elétrica da planta de geração; HO (horas) é o número de horas diárias de operação do grupo motor gerador; e $\cos\phi$ - Fator de potência igual a 0,8.

Conversão do digestato em biofertilizante

Para se estimar quantidade de nutrientes na massa de biofertilizante, utilizou-se os parâmetros apresentados por Oliveira *et al.* (1993), conforme a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros adotados para estimar a massa de nutrientes em kg/m³

Densidade do dejetosuíno (kg/m ³)	N (kg/m ³)	P ₂ O ₅ (kg/m ³)	K ₂ O (kg/m ³)
1012	2.12	1.75	1.25

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (1993)

Os fertilizantes minerais possuem uma concentração dos nutrientes, sejam 45% de nitrogênio (N) na Ureia, 60% de Óxido de potássio (K₂O) no Cloreto de Potássio e 18% de Pentóxido de fosforo (P₂O₅) no Superfosfato Simples (Pedroni, 2022). E para estimar a equivalência em toneladas se utilizou de uma proporção, que indica que 1 tonelada de N produz 2,2 toneladas de Ureia; 1 tonelada de K₂O produz 1,66 toneladas de Cloreto de Potássio; e que 1 tonelada de P₂O₅ produz 5,55 toneladas de Superfosfato Simples.

6.2.6 Módulo 3 – RECEITAS

Para as estimativas das receitas, em ambos os cenários, considerou-se a venda/economia da energia elétrica; a comercialização do biofertilizante e do crédito de carbono. Calculou-se a economia a partir do produto entre o Potencial técnico de produção de eletricidade e o custo kWh de uma residência rural na Paraíba, neste trabalho considerou-se de R\$ 0,269 kWh⁻¹ (ENERGISA PARAÍBA, 2024). A receita atribuída com a comercialização ou economia do biofertilizante foi estimada por meio da PADS; da densidade dos nutrientes apresentados pela Tabela 6.2; da relação entre os biofertilizantes e seus equivalente minerais e ainda dos valores de insumos expostos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valores de mercado dos insumos agroquímicos em 2024.

Produto	Valor (R\$/T)
Uréia	R\$ 2.989,00
Cloreto de Potássio	R\$ 2.357,33
Superfosfato Simples	R\$ 1.847,50

Fonte: adaptado do CONAB (2024).

As receitas obtidas com o crédito de carbono pelo tratamento dos resíduos suínos são estimadas por meio da Equação 6.7.

$$RC = 28 \cdot Vol \cdot D \cdot CC \quad (6.7)$$

onde RC é a receita anual de créditos de carbono (R\$), 28 é o Valor do potencial de aquecimento global (GWP) relativos ao CO₂ - Quinto Relatório de Avaliação (AR5); Vol é o volume de dejetos suínos; D é a densidade adotada; e CC é a Cotação média do crédito de carbono (R\$) adotada.

6.2.7 Módulo 4 – DESPESAS

Os custos relacionados a implementação, operação e manutenção do projeto estão limitados as nuances do mercado. Os custos relacionados a mão-de-obra e aquisição dos animais não foram incorporados neste estudo. Considerou-se o negócio como uma oportunidade de vantagem competitiva a partir de um passivo ambiental recorrente nos empreendimentos rurais ou agropecuários.

O motor gerador escolhido para esse projeto foi o modelo 6.12TCEG-G3 da MWM com potência nominal de 165 kVA. O sistema conta com acessórios de contagem, controle e tratamento, e ainda se escolheu para o arranjo o Biodigestor Sansuy de 6000 m³ com declividade 45°. O reator de biodigestão, considerado para um plantel expansível até 2000 animais, e as adequações nas conexões pertinentes com obras civis, bem como, a conexão com a rede elétrica também são considerados como despesas neste trabalho, como mostra a tabela 4.

Tabela 6.4 – Investimentos para aquisição dos equipamentos para o empreendimento.

Item	Valor
Motor Gerador	R\$ 234.211,91
Biodigestor	R\$ 515.291,61
Acessórios	R\$ 16.374,89
Sistema de tratamento	R\$ 212.898,29
Entrega técnica	R\$ 10.663,82
TOTAL	R\$ 992.440,52

Fonte: adaptado de proposta técnica (MWM Geradores, 2024).

6.2.8 Viabilidade Técnica

A viabilidade técnica para os três cenários foi analisada com base nos métodos apresentados nos módulos 1 e 2 do itinerário de cálculo. Observando a capacidade em um plantel com 500, 1000, 1200 e 2000 cabeças. Os dados estimados foram comparados aos calculados pela calculadora da Rede BiogasFert, a BiogásFORT (Embrapa, 2024). O principal fator analisado foi a capacidade do plantel em produzir o volume necessário de biogás para alimentar o motor-gerador. Sendo considerado viável com ressalvas técnicas

aquelas configurações que projetem volumes suficientes para motores de 64 kVA em regime contínuo, utilizado para um plantel com menor potencial de produção de metano. Todavia, o conjunto escolhido como principal item a ser adquirido para o investimento foi o motor de fabricação da MWM Geradores, tipo BIOGÁS, modelo MGB165.60.01, potência de 165kVA (Contínuo), fator de potência 0,8, tensão trifásica de 220 Vca - 60 Hz, operação SINGELO, de funcionamento automático. Segundo a consultoria do fabricante, a condição ideal para o funcionamento do gerador seria no formato com 1200 cabeças de suínos no regime de criação de ciclo completo. Tal recomendação não será tomada como regra de viabilidade.

6.2.9 Viabilidade Econômica

O estudo da viabilidade econômica foi realizado para os três cenários propostos conforme os módulos 3 e 4 do itinerário de cálculo. Desse modo, utilizou-se o VPL – Valor Presente Líquido; da TMA – Taxa Mínima de Atratividade e TIR – taxa interna de Retorno; e Payback descontado, como proposto no trabalho de Melo (2023).

O VPL – Valor Presente Líquido, calculado utilizando a Equação 6.8, representa o balanço do fluxo de caixa do empreendimento ao longo dos anos, trazido para o presente, com valores positivos se viável economicamente (Dantas, 2023).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \left[\frac{FC_t}{(1+k)^t} \right] - I_0 \quad (6.8)$$

dado que, VPL – Valor Presente Líquido; FC – valor futuro considerado, que é o valor de despesa ou receita do fluxo de caixa que se deseja trazer para o valor presente (VPL); e n – período de análise em anos, considerado $n = 10$; t – tempo do fluxo de caixa correspondente ao valor futuro considerado (FC), como $n = 10$, t varia de 1 a 10; k – taxa de remuneração do capital, representado por um percentual de correção dos valores no tempo; I_0 – Investimento inicial, feito no tempo 0 do fluxo de caixa, ou seja, $t = 0$.

A TMA – Taxa Mínima de Atratividade, ou custo de oportunidade, representa o percentual de remuneração do capital investido no mercado financeiro, caso a decisão seja não investir no empreendimento. Adotou-se como TMA o rendimento atual da poupança que é de 7,48% ao ano (Brasil Indicadores, 2024). A TIR – Taxa interna de retorno é a taxa

de remuneração do capital investido e resulta do fluxo de caixa do negócio. A TIR também é obtida a partir da equação 6.7 quando o VPL = 0.

O empreendimento se torna atrativo se a TIR for maior que a TMA. Utiliza-se o índice TMA/TIR que expressa essa relação, quanto mais baixo for esse melhor é o empreendimento (Salim; Ferreira; Salim, 2013).

O Payback descontado é comumente expresso em anos, apontando o tempo necessário para que os fluxos de caixa positivos ultrapassem os fluxos de caixa negativos do negócio, considerando a taxa de juros. O cálculo do Payback dos cenários é dado pela Equação 6.9.

$$VP = \frac{VF}{(1 + i)^n} \quad (6.9)$$

onde, VP é o Valor presente; VF é Valor futuro; i é a taxa de juros; n é o ano de ocorrência do fluxo.

6.2.10 Viabilidade Ambiental

Para a avaliação da viabilidade ambiental utilizou a comparação do montante de CO₂ emitido a partir do plantel de animais sem e com tratamento e beneficiamento dos dejetos suínos. Estimou-se a massa de CO_{2eq} por meio do produto entre o volume estimado de dejetos suínos e densidade considerada de 1012 kg/m³ (Oliveira *et al.*, 1993).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos a partir da análise dos dados frente à viabilidade técnica, financeira e ambiental, para os três cenários elencados, em configurações de plantéis com 500, 1000, 1200 e 2000 animais. Em ambos os casos se observou que a estimativa para a viabilidade técnica depende dos valores considerados para o potencial de metanização, a carga de dejetos, a forma de manejo, e o número de animais. Já a viabilidade financeira depende da obtenção de lucro e do potencial de pagamento do valor investido ao longo do tempo. A viabilidade ambiental depende, neste trabalho, da oportunidade da transformação do metano para um gás com menor poder poluidor, bem como o tratamento de resíduos.

6.3.1 Cenário 1

O primeiro cenário, a partir do método descrito e utilizado neste trabalho, apresentou uma produção de biogás (PrBiogás) de 96,98 m³ diariamente para um plantel de 500 animais com manejo de ciclo completo, o que para o arranjo técnico de menor potência do mesmo fornecedor (64 kVA) já é insuficiente, totalizando uma vazão de biogás de cerca de 18,60 m³/h, e de 11,15 m³/h de metano. Assim, essa configuração não é viável, com uma produção potencial teórica de eletricidade de 1065,2 kWh/dia. No aspecto financeiro o arranjo apresenta um VPL negativo de R\$ 274.359,40, desse modo, também financeiramente é inviável. No aspecto ambiental, estima-se uma emissão de metano de 71 toneladas ao ano, que se convertidas, podem ser evitadas de serem lançadas a atmosfera.

Para o plantel de 1000 cabeças, ainda não se demonstrou a viabilidade técnica para o arranjo de referência (165 kVA). No entanto, a configuração performa 22,30 m³/h de metano o que poderia cumprir com a vazão necessária para o motor gerador de 64 kVA. A análise financeira apresentou um VPL de R\$ 443.721,72, e um Payback de 4 anos e 8 meses. A massa de metano é estimada em 142 toneladas ao ano.

Para o Plantel de 1200 cabeças, número de cabeças que é o recomendado pelo fornecedor do arranjo de 165 kVA, estimou-se que a viabilidade técnica só é possível em conjuntos geradores de menor potência, 64 kVA, pois a vazão projetada é de 26,75 m³/h de metano. O VPL é estimado em R\$ 730.954,16, e com Payback de 4 anos.

No plantel com 2000 cabeças verificou-se que há viabilidade técnica, com uma produção estimada de 74,34 m³/h de biogás e 44,6 m³/h de metano, uma vez que o fabricante do conjunto motor-gerador (165 kVA) recomenda uma vazão de 60 m³/h. O excedente potencial de 14,34 m³/h deve ser armazenado para flutuações na produção. A partir do método utilizado neste trabalho, estima-se que a potência da planta com 2000 animais em manejo de ciclo completo é de 231,57 kVA e uma produção potencial teórica de eletricidade de 4,3 MWh. O Payback neste caso se dá em aproximadamente 2 e 5 meses. O VPL estimado é de R\$ 1.879.883,95.

6.3.2 Cenário 2

Observa-se que a viabilidade técnica, segundo o fabricante, só se dá com um PTCE em torno de 3440,3 kWh/dia, o que decorre da alimentação de cerca de 60 m³/h de biogás. Desse modo o cenário 2 não difere tecnicamente do cenário anterior. As principais mudanças relativas ao primeiro cenário são quanto ao aspecto financeiro e quantidade de metano

evitada. Sendo assim, para a metodologia utilizada neste trabalho, só é viável tecnicamente o plantel com mais de 1621 cabeças, portanto o plantel de 2000 animais.

Ao realizar a análise financeira, a estimativa do plantel com 500 animais projetando o aproveitamento bioenergético e a comercialização do material digerido - o digestato - subproduto obtido da biodigestão dos dejetos suínos, se mostra com o VPL positivo, R\$ 1.902.228,81 e um Payback de aproximadamente 2 anos e 5 meses. Salienta-se que o VPL positivo já é possível com 172 animais neste segundo cenário. Para essa configuração, obteve-se uma receita com a economia/venda de energia elétrica de R\$ 35.817,58 ao ano. A receita potencial com os biofertilizantes é de R\$ 109.119,09 ao ano.

Ao se estimar o rendimento financeiro para o plantel de 1000 animais verificou-se que um VPL positivo de R\$ 4.796.898,14 e um Payback de 1 ano e 2 meses aproximadamente. O VPL para o plantel de 1.200 suínos é de R\$ 5.954.765,87 e com Payback de 1 ano.

Ao estimar o plantel de 2.000 animais, observando que a viabilidade técnica já é compreendida desde a análise dos resultados do cenário 1, foi obtido um VPL de R\$ 10.586.236,80, e um faturamento anual de R\$ 1.685.310,21; um Payback de 6 meses e uma TIR de 170%. A partir das relações de equivalência dos biofertilizantes e dos resultados obtidos, pode-se resumir as receitas e despesas estimadas, conforme a Tabela 5.

Tabela 6.5 – Receitas anuais da configuração do plantel com 2000 animais no cenário 2.

Item	Quantidade	Valor
Economia/venda de eletricidade	1.55 GWh	R\$ 416.483,54
Equivalente de Ureia	161.82 t	R\$ 483.680,43
Equivalente de Cloreto de Potássio	71.34 t	R\$ 168.183,06
Equivalente de Superfosfato Simples	333.94 t	R\$ 616.963,18
Total:		R\$ 1.685.310,21

Fonte: O autor, 2024.

6.3.3 Cenário 3

No terceiro cenário projetado ocorre a comercialização do valor em potencial de créditos de carbono a serem obtidos pela combustão do metano presente no biogás. Dessa forma, não há mudanças quanto aos aspectos técnicos e ambientais, mas existe uma variação positiva no aspecto financeiro.

Embora já discutido no primeiro cenário, o plantel com 500 animais não é viável tecnicamente com os arranjos tecnológicos escolhidos (165 kVA), mas ao se observar apenas

pelo prisma financeiro, adicionada a venda dos créditos de carbono acumulando com a comercialização de biofertilizantes e a economia/venda de energia elétrica, tem-se um salto nas receitas. O VPL é de R\$ 6.400.053,82, com um Payback aproximado de 11 meses e arrecadação anual de R\$ 1.075.999,08. A receita anual estima com a venda dos créditos de carbono performa R\$ 655.760,90. Para cada crédito de carbono é atribuído R\$ 318,10 a cada tonelada estimada, aos 9 de março de 2024.

Do plantel com 1000 animais estima-se uma arrecadação anual de R\$ 1.496.237,26; um VPL de R\$ 9.287.238,79 e um Payback de pouco mais de 8 meses. Quando projetado o plantel de 1200 cabeças há números semelhantes, com um VPL ultrapassando os 10 milhões.

Estimando a configuração com 2000 suínos em manejo de ciclo completo no cenário 3, observa-se os resultados mais promissores. O VPL salta para R\$ 15.061.608,73; um Payback próximo a 5 meses; e uma arrecadação anual de R\$ 2.336.713,63. O valor considerado para o investimento foi de R\$ 992.440,52, tal qual utilizado nos outros cenários anteriores. A receita estimada com a venda de crédito de carbono para o plantel de 2000 animais é de cerca de R\$ 655.760,90 ao ano.

Outras equivalências é a possibilidade de combustível para cocção, como o GLP, cerca de 800 botijões de 13 kg ao dia ou ainda, o fornecimento potencial de energia elétrica suficiente para 995 casas.

6.3.4 Resultados comparados

A partir de estimativas na plataforma da Rede Biogásfert pela Calculadora Biogásfort, conforme Tabela 6.6, observou-se que para um plantel de 500 animais há uma produção diária de 331,8 m³ de biogás; um potencial técnico de produção de eletricidade de 597,3 kWh/dia, com uma planta de 32,4 kVA. Os resultados da BiogásFort, assim como os resultados deste trabalho, indicaram que a viabilidade técnica não se dá com 13,8 m³/h, como foi estimado nesta configuração de 500 suínos em ciclo completo.

Na configuração de 2000 animais, a BiogásFort estima-se que o plantel produza 1327 m³ de biogás, compreendendo em 55,29 m³/h, ainda insuficiente para o suportar a demanda do arranjo de 165 kVA escolhido como referência, no entanto outros arranjos podem ser acoplados. O VPL positivo de 618.024,54 reais, no cenário 1, e de 19.155.690,42 no cenário 3. O Payback no cenário 3 é de 4 meses, aproximadamente. A produção energética estimada pelo método da BiogásFort indica que o aporte elétrico abasteceria 560 casas.

Tabela 6.6 – Síntese dos resultados obtidos pelo método BiogásFort.

Plantel	PDD (m³/d)	PrBiogas (m³/d)	PrM (m³/d)	PTCE (kWh/d)	VPL1 (R\$)	BFert (t/a)	VPL2 (R\$)	CH ₄ (t/a)	VPL3 (R\$)
500	23.6	331.8	138.7	597.3	- 589.790,55	141.7	1.790.906,99	36.79	4.042.472,04
1000	47.1	663.7	277.4	1195	- 186.870,93	283.7	4.579.466,56	73.59	9.082.596,66
1200	56.5	796.4	332.9	1434	- 25.757,02	340.47	5.694.385,62	88.31	11.098.466,40
2000	94.2	1327	554.8	2389	618.024,54	567.3	10.149.430,23	147.18	19.155.690,42

Fonte: O autor, 2024.

O conjunto de configurações para um plantel suíno com aproveitamento energético, rentável financeiramente e com tratamento de resíduos é um desafio para o empreendedorismo rural. Os arranjos podem ser pensados e projetados por diferentes métodos e para auxiliar o processo de tomada de decisão é necessário fazer uma análise complexa das variáveis, sejam técnicas, econômicas, ambientais e sociais. A partir da Figura 6.3 é possível comparar os cenários apresentados e estimados a partir dos diferentes métodos de estimativa e ainda combinados com diferentes números de cabeças animais.

Figura 6.3 – Síntese dos cenários de viabilidade para os diferentes planteis exemplificados:

ARRUDA	CÉNARIO 1			CÉNARIO 2			CÉNARIO 3		
nº de animais	VT	VF	VA	VT	VF	VA	VT	VF	VA
500									
1000									
1200									
2000									
BIOGASFORT	CÉNARIO 1			CÉNARIO 2			CÉNARIO 3		
nº de animais	VT	VF	VA	VT	VF	VA	VT	VF	VA
500									
1000									
1200									
2000									
LEGENDA:		Viável			Viável com ressalvas			Inviável	

Fonte: O autor (2024)

Na Figura 6.3, VT é a viabilidade técnica, que considera a vazão mínima de biogás necessária para geração de energia; VF é a viabilidade financeira, que considera o VPL, a TMA e TIR, e o *Payback*; a VA, a viabilidade ambiental, que descreve a conversão de metano em dióxido de carbono, que aqui em todos os cenários se considera tal possibilidade, independente da verificação da viabilidade técnica.

A partir da metodologia de avaliação utilizada neste trabalho conforme a Figura 6.3, observou-se que a viabilidade plena (técnica, financeira e ambiental) ocorreu nos cenários 1, 2 e 3, a partir do plantel com 2000 animais. Onde as configurações de plantéis com 1000 e 1200 animais apresentaram uma ressalva, indicando que a viabilidade ocorre apenas quando o utilizado o motor de menor potência ($165 > \text{kVA} \geq 65$). Quando utilizada a configuração o motor de 165 kVA apenas a configuração com 2000 animais é plenamente viável, para ambos os cenários. No primeiro cenário, a partir da estimativa do presente trabalho, não há viabilidade técnica e nem financeira para o plantel de 500 suínos, o que pode indicar que o negócio não é oportuno, nem com ajustes técnicos. Ainda no cenário 1 o plantel com 1000 animais ganha viabilidade financeira, E pode ser uma oportunidade de negócio se ajustar tecnicamente a partir da capacidade da potência do conjunto motor-gerador. Pode-se dizer o mesmo do plantel com 1200 suínos.

No cenário 2, já no plantel com 500 animais há viabilidade financeira, mesmo que ainda não exista capacidade técnica para suportar um gerador de porte mínimo, o que pode depreender que a comercialização e biofertilizantes já seria suficiente para suportar o negócio, independentemente da geração de energia elétrica, um aspecto que também pode ser aplicado do plantel com 1200 para este cenário. O terceiro cenário, a partir da metodologia deste trabalho repete a figura do segundo cenário qualitativamente, mas ultrapassa os aspectos quantitativos, em receitas.

Observando os cenários da BiogásFort, verificou-se que há um rigor relativo ao método utilizado neste trabalho, com valores quantitativos e qualitativos inferiores ou menos positivos. A viabilidade técnica não será dada para o conjunto motor gerador de 165 KVA, a única faixa de plantel a chegar o mais próximo é a configuração com 2000 animais, com 55,3 m³/h de biogás. Desse modo, a partir do método BiogásFort, a planta terá uma potência menor, ou mudará o regime de operação, para ser compatível com a capacidade de vazão de biogás.

Ainda, no primeiro cenário verificou-se que os plantéis de 500, 1000 e 1200 não são viáveis financeiramente. Isso muda a partir do segundo cenário, indicando que a venda de biofertilizantes favorece a sustentabilidade do negócio podendo ser aumentada com a venda de crédito de carbono presente no cenário 3.

A biodigestão e a transformação da energia potencial dos biocombustíveis - biogás – sozinha não é suficiente para sustentar financeiramente a negócio. Porém, a oportunidade requer o beneficiamento de biorresíduos advindos de dejetos suínos ao produzir biofertilizantes.

6.4 CONCLUSÃO

Ao longo desse estudo, foram feitas várias simulações, projetando cenários e configurações de arranjos tecnológicos, números de animais, e possibilidades bioeconômicas de negócio.

Verificou-se que a marca de 2000 suínos em manejo de ciclo completo garante a geração de energia a partir da biodigestão, e mantém a viabilidade econômica e ambiental para esse estudo de caso nesse município, essa oportunidade de negócio tem um *upgrade* na venda de biofertilizante a partir do tratamento do digestato, bem como, na comercialização dos créditos de carbono.

Observou-se também que a partir da faixa de 1000 animais pode-se adaptar a capacidade técnica, com geradores de menor potência, e proporcionar a viabilidade financeira, equacionada com a comercialização de biofertilizantes, ao passo que se diminui o risco do negócio e garante ao passar do tempo solidez para o aumento do plantel, junto com melhores arranjos tecnológicos.

Aferiu-se que 1.621 suínos são suficientes para garantir a expansão do negócio até 2000 cabeças; além de proporcionar a viabilidade ambiental com tratamento 76,34 m³ resíduos da pecuária; e gerar 1,26 GWh/ano, o equivalente para abastecer 806 residenciais unifamiliares todos os meses, performando uma economia/venda potencial de R\$ 337.559,91 ao ano, com um *Payback* de 2 anos e 10 meses. Ainda, nessa mesma oportunidade, aplicado o acoplamento de estruturas e da cadeia bioeconômica de negócios, pode-se produzir um montante anualmente 142,68 t de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), equivalente a R\$ 1.028.384,02; além do mais a comercialização dos créditos de carbono pode ser realizada, significando mais R\$ 655.760,90 em receitas ao ano.

Conclui-se que tais estimativas e simulações apresentaram opções no espectro da vocação bioeconômicas do município de Pedras de Fogo-PB, sobretudo no que diz respeito as oportunidades na (agro)pecuária. Esse trabalho também tem a intenção de despertar interesses na criação de grupos de trabalhos técnicos para pesquisas bioenergéticas com foco no desenvolvimento da bioeconomia local favorecendo os rearranjos locais de forma sustentável.

6.5 REFERÊNCIAS

- Avellar, L. H. N. (2001). *Valorização dos subprodutos da agroindústria visando a cogeração e a redução da poluição ambiental*. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” .
- Barros, E. C., Nicoloso, R., Oliveira, P. A. V. de, & Corrêa, J. C. (2019). *Potencial agrônomo dos dejetos suínos*.
- Bentes, R. F., & Benitz, T. (2024). Indicação geográfica como estratégia disruptiva nas cadeias de valor da bioeconomia amazônica. *Peer Review*, 6(2), 1–15. <https://doi.org/10.53660/PRW-1717-3328>
- Brasil Indicadores. (2024, March 9). *Caderneta de Poupança*. <https://Brasilindicadores.Com.Br/Poupanca/>.
- CONAB. (2024). RELATÓRIO DE INSUMOS AGROPECUARIOS - FERTILIZANTES. In *RELATÓRIO DE INSUMOS AGROPECUARIOS*. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB.
- Dantas, D. H. C. (2023). *Economia Empresarial* (Única). Editora Senac.
- De Oliveira, P. A. V, DE OLIVEIRA, P. A. V., & others. (1993). *Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos*.
- EMBRAPA. (2017). *EMBRAPA GADO DE LEITE - Sistema de alimentação*.
- EMBRAPA - Suínos e Aves. (2024). *Calculadora BiogásFORT®*. <https://Www.Embrapa.Br/Suinos-e-Aves/Biogasfert/Calculadora>.
- ENERGISA PARAÍBA. (2024). Quadro de Tarifas. In *ENERGISA PARAÍBA - RESOLUÇÃO ANEEL N.º 3.250 de 02/04/2024*.
- Fontanesi, L., Nanni Costa, L., Petracci, M., Trevisi, P., & others. (2024). Produzioni animali e bioeconomia. *Le Scienze Agrarie Nella Bioeconomia*, 31.
- Freitas, G. P. de, Nóbrega, C. C., Sá, A. C. N. de, Souza, G. F. de, Leite, M. J. de H., Farto, C. D., & Oliveira, A. C. N. (2024). Valoração de resíduos orgânicos em sistemas de biodigestores no contexto da bioeconomia. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(3), e5673. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.3-280>
- Gerona, L. N. (2024). LEVANTAMENTO DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS SOBRE A GESTÃO AMBIENTAL NA SUINOCULTURA, ATRAVÉS DO USO DE BIODIGESTOR. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 13(1), e8803. <https://doi.org/10.59306/rgsa.v13e12024e8803>

HENRIQUE PISETTA RUDECK, V., GUIMARÃES CAMARGO CAMPOS, C., PETRY RUFATO, D., & CRISTANI, Jose. (2024). ANÁLISES DESCRITIVAS DOS VALORES MÉDIOS E ABSOLUTOS DO BALANÇO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E A EVAPORAÇÃO POTENCIAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE ESTERQUEIRAS NA SUINOCULTURA. *Geoambiente On-Line*.

Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J. M., & Corona, F. (2023). Biodegradable Wastes in Bioeconomy. In *Waste Management in the Circular Economy* (pp. 55–76). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42426-7_4

Hoyos-Sebá, J. J., Arias, N. P., Salcedo-Mendoza, J., & Aristizábal-Marulanda, V. (2024). Animal manure in the context of renewable energy and value-added products: A review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 196, 109660. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109660>

IBGE. (2024a). PAM - Produção Agrícola Municipal . In *Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias*.

IBGE. (2024b). *Tabela 3939 IBGE - Pesquisa da Pecuária Municipal*.

IBGE. (2024c, May 23). *PEDRAS DE FOGO*. IBGE CIDADES. Disponível Em: <https://Cidades.Ibge.Gov.Br/>. Acesso Em: 16 Fev. 2022.

Lima, J. Y. de M. (2018). *Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil*.

Lubjuhn, S., & Venghaus, S. (2024). Unlocking the potential of the bioeconomy for climate change reduction: The optimal use of lignocellulosic biomass in Germany. *Journal of Industrial Ecology*, 28(1), 144–159. <https://doi.org/10.1111/jiec.13455>

Melo, C. B. de, & others. (2023). Viabilidade técnica e econômica de uma unidade geradora de energia elétrica a partir do biogás proveniente de dejetos suínos de pequenos produtores rurais da região do oeste do paraná: produção centralizada x produção descentralizada de biogás.

MITO, J. Y. de L., KERKHOFF, S., SILVA, J. L. G., VENDRAME, M. G., STEINMETZ, R. L. R., & KUNZ, A. (2018). *Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil*.

MWM GERADORES. (2024). PROPOSTA TÉCNICA E COMERCIAL. In *Proposta Técnica e Comercial para fornecimento de Sistema de Biodigestão e complementos*. MWM GERADORES.

Pedroni, R. C. (2022). *Análise de viabilidade técnica-econômica de rotas de aproveitamento de energia alternativa proveniente de resíduos rurais*.

Salim, C., Ferreira, C. F., & Salim, H. (2013). *Implantando uma empresa: a partir do plano de empreendimento* (Vol. 1). Elsevier Brasil.

Saviotti, B., Pazinato, C., Coser, F., Leitão, F., & Oliveira, P. A. V. de. (2016). *Suinocultura de baixa emissão de carbono: tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econ mico dos resíduos da produção de suínos*.

Taron, A., & Gebrezgabher, S. (2024). Circular Bioeconomy: A Pathway to Sustainable Development in an Age of Global Crisis. In *International Trade, Economic Crisis and the Sustainable Development Goals* (pp. 99–117). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/978-1-83753-586-620241007>.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a distribuição e o potencial dos recursos da bioenergia animal no Estado da Paraíba; novas perspectivas com base no hidrogênio verde, bem como, apresentou uma simulação de viabilidade de um arranjo bioenergético para uma cidade paraibana.

Ao introduzir esse trabalho procurou-se munir o leitor do estoque energético disponível e das problemáticas encontradas mundialmente e em especial a nível nacional. Com isso, pode-se ao longo da pesquisa, explorar o estado da arte da produção científica e das pesquisas recentes acerca da bioenergia por meio da biodigestão, observando diferentes arranjos tecnológicos e combinações de oportunidades bioeconômicas para biomassa. Tal busca é de suma importância para se verificar a vanguarda academia, como também das práticas nacionais e internacionais na geração de ER, em especial com a inovação em hidrogênio verde, e na EC.

Uma das buscas deste foi apresentar o potencial brasileiro para o aproveitamento energético da biomassa de dejetos animais, bem como, apontar por meio de indicadores econômicos e espaciais sítios tecnológicos propícios para o aproveitamento da biomassa animal. A descoberta de regiões com diferentes potenciais no Estado da Paraíba indica locais por onde o investimento estatal deve começar e induzir a formação de núcleos bioenergéticos.

Ainda, buscou-se simular cenários de viabilidade econômica, técnica e ambiental de um negócio na suinocultura, a fim de promover a bioeconomia em uma oportunidade bioenergética. O modelo proposto apresenta como principal benesse a produção de proteína animal, o tratamento dos dejetos - poluentes ambientais, a conversão de energia elétrica e posterior venda ou economia, a comercialização de biofertilizantes e créditos de carbono.

Por fim, a pesquisa e os objetos abordados apontaram para um terreno fértil e possível para o Brasil e em especial para o Estado da Paraíba, com as energias renováveis de base biológica, seja em articulações regionais, como a região intermediária de Campina Grande, ou ainda, em uma pequena comunidade rural de uma cidade com uma população inferior a 30 mil habitantes, como é Pedras de Fogo-PB.

8 REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, A. *et al.* Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 301, p. 122725, 2020.
- AGYEKUM, E. B. *et al.* A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation. [S. l.]: MDPI, 2022.
- AKTAR, M. A.; ALAM, M. M.; AL-AMIN, A. Q. Global economic crisis, energy use, CO2 emissions, and policy roadmap amid COVID-19. [S. l.]: Elsevier B.V., 2021.
- ALI BEKHET, H.; YASMIN, T. Assessment of the global financial crisis effects on energy consumption and economic growth in Malaysia: An input–output analysis. *International Economics*, [s. l.], v. 140, p. 49–70, 2014.
- AMIN, F. R. *et al.* Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Express*, [s. l.], v. 7, n. 1, 2017.
- ANDREIDES, D. *et al.* Biological conversion of carbon monoxide and hydrogen by anaerobic culture: Prospect of anaerobic digestion and thermochemical processes combination. *Biotechnology Advances*, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 58, p. 107886, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975021001920>.
- ANNIE MODESTRA, J. *et al.* Prospects and trends in bioelectrochemical systems: Transitioning from CO2 towards a low-carbon circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 364, 2022.
- ARCHER, S. A.; STEINBERGER-WILCKENS, R. Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 43, n. 52, p. 23178–23192, 2018.
- BAUER, C. *et al.* On the climate impacts of blue hydrogen production. [s. l.], 2022.
- CHOZHAVENDHAN, S. *et al.* Current and prognostic overview on the strategic exploitation of anaerobic digestion and digestate: A review. *Environmental Research*, [s. l.], v. 216, 2023.
- EMEBU, S.; PECHA, J.; JANÁČOVÁ, D. Review on anaerobic digestion models: Model classification & elaboration of process phenomena. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 160, p. 112288, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032122002076>.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2022. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022a.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BEN - Séries Históricas e Matrizes. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2022b.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Balanço Energético Nacional - BEN Interativo. Rio de Janeiro: [s. n.], 2024.
- ENERGY RESEARCH COMPANY. National Energy Balance - BEN. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso at: 10 Nov. 2022.
- FAN, Q. *et al.* Anaerobic digestion of wood vinegar wastewater using domesticated sludge: Focusing on the relationship between organic degradation and microbial communities (archaea, bacteria, and fungi). *Bioresource Technology*, THE BOULEVARD, LANGFORD

LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 347, p. 126384, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852421017260>.

FORTES, H. J. Matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050: desafios e oportunidades para a neindustrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis. [s. l.], 2024.

GREGORIE, E. F. J. *et al.* Hydrogen and Biogas. *Micro-Optics and Energy*, [s. l.], p. 131–155, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-43676-6_10. Acesso at: 23 Oct. 2022.

HAJJI, Y. *et al.* Assessment of an accidental hydrogen leak from a vehicle tank in a confined space. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 47, n. 66, p. 28710–28720, 2022.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. *Renewables Information 2022*. Paris: [s. n.], 2022a.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Balances Highlights Data sets*. Paris: Internacional Energy Agency, 2022b.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2022 (WEO)*. Paris: [s. n.], 2022c.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. *Fast-Track Energy Transitions to Win the Race to Zero*. Abu Dhabi: [s. n.], 2021.

ISHAQ, H.; DINCER, I.; CRAWFORD, C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 47, n. 62, p. 26238–26264, 2022.

KARMAKAR, A.; KARMAKAR, S.; MUKHERJEE, S. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 101, n. 19, p. 7201–7210, 2010.

KE, L. *et al.* Lignocellulosic biomass pyrolysis for aromatic hydrocarbons production: Pre and in-process enhancement methods. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2022.

KUNATSA, T.; XIA, X. A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 344, p. 126311, 2022.

MAJEED, M. T.; LUNI, T.; TAHIR, T. Growing green through biomass energy consumption: the role of natural resource and globalization in a world economy. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], v. 29, n. 22, p. 33657–33673, 2022.

MUKELABAI, M. D.; WIJAYANTHA, U. K. G.; BLANCHARD, R. E. Renewable hydrogen economy outlook in Africa. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2022.

NATIONAL AGENCY FOR PETROLEUM, N. G. and B. *RenovaBio*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso at: 8 Dec. 2022.

NESHAT, S. A. *et al.* Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 79, p. 308–322, 2017.

ODUOR, W. W. *et al.* Enhancement of anaerobic digestion by co-digesting food waste and water hyacinth in improving treatment of organic waste and bio-methane recovery. *Heliyon*, [s. l.], v. 8, n. 9, 2022.

OTTONI, J. R. *et al.* Cultured and uncultured microbial community associated with biogas production in anaerobic digestion processes. *Archives of Microbiology*, ONE NEW YORK

- PLAZA, SUITE 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES, v. 204, n. 6, p. 340, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00203-022-02819-8>.
- PERIŠIĆ, M. *et al.* The Role of Bioeconomy in the Future Energy Scenario: A State-of-the-Art Review. [S. l.]: MDPI, 2022.
- POPP, J. *et al.* Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, [s. l.], v. 60, p. 76–84, 2021.
- RABBI, M. F. *et al.* Energy Security and Energy Transition to Achieve Carbon Neutrality. *Energies*, [s. l.], v. 15, n. 21, p. 8126, 2022.
- REED, J. *et al.* Time-phased geospatial siting analysis for renewable hydrogen production facilities under a billion-kilogram-scale build-out using California as an example. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 47, n. 66, p. 28224–28243, 2022.
- ROCHA, J. V. P. A. Uso de energias renováveis em processos contínuos: um estudo em uma grande corporação do Brasil. [s. l.], 2024.
- ROMERO-PERDOMO, F. *et al.* Research Trends on Climate Change and Circular Economy from a Knowledge Mapping Perspective. *Sustainability (Switzerland)*, [s. l.], v. 14, n. 1, 2022.
- RUSSO, D. *et al.* State of the art of biofuels from pure plant oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 4056–4070, 2012.
- SHAHID, M. K. *et al.* Biofuels and biorefineries: Development, application and future perspectives emphasizing the environmental and economic aspects. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 297, 2021.
- SHARMA, K. Carbohydrate-to-hydrogen production technologies: A mini-review. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND*, v. 105, p. 138–143, 2019.
- SHARMILA, V. G.; SHANMUGAVEL, S. P.; BANU, J. R. A review on emerging technologies and machine learning approaches for sustainable production of biofuel from biomass waste. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 180, p. 106997, 2024.
- THIRUSELVI, D. *et al.* A critical review on global trends in biogas scenario with its upgradation techniques for fuel cell and future perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 46, n. 31, p. 16734–16750, 2021.
- UMAR, M. *et al.* COP21 Roadmap: Do innovation, financial development, and transportation infrastructure matter for environmental sustainability in China?. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 271, p. 111026, 2020.
- UNITED NATIONS. Renewable Energy—Powering a Safer Future. [S. l.], 2023.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Decision 1/CP.17. 5 dec. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/9064>. Acesso at: 10 Nov. 2022.
- VON ZUBEN, T. W. *et al.* Is Hydrogen Indispensable for a Sustainable World? A Review of H₂ Applications and Perspectives for the Next Years. *J. Braz. Chem. Soc.*, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 824–843, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20220026>.
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION - WBA. GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2021. [S. l.: s. n.], 2021.
- YAQUB QAZI, U. Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15134741>.

ZHOU, Y. *et al.* Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. [S. l.]: Materials China, 2022.