

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



AMANDA LIMA MORAES DOS SANTOS

**CADEIA DE PROCESSAMENTO DE MANDIOCA: TENDÊNCIAS MUNDIAIS
DE TRATAMENTO DOS EFLUENTES E OPORTUNIDADES DE
MELHORIAS NA LINHA DE PRODUÇÃO DE UMA CASA DE FARINHA DO
ESTADO DE ALAGOAS**

MACEIÓ

2021

AMANDA LIMA MORAES DOS SANTOS

**CADEIA DE PROCESSAMENTO DE MANDIOCA: TENDÊNCIAS MUNDIAIS
DE TRATAMENTO DOS EFLUENTES E OPORTUNIDADES DE
MELHORIAS NA LINHA DE PRODUÇÃO DE UMA CASA DE FARINHA DO
ESTADO DE ALAGOAS**

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

Orientadora: Prof^ª Dra. Daniele Vital Vich

Coorientadora: Prof^ª Dra. Karina Ribeiro Salomon

MACEIÓ

2021

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

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

- S237c Santos, Amanda Lima Moraes dos.
Cadeia de processamento de mandioca : tendências mundiais de tratamento dos efluentes e oportunidades de melhorias na linha de produção de uma casa de farinha do estado de Alagoas / Amanda Lima Moraes dos Santos. – 2021.
114 f. : il. color.
- Orientadora: Daniele Vital Vich.
Co-orientadora: Karina Ribeiro Salomon.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.
- Bibliografia: f. 100-114.
1. Bibliometria. 2. Água - Desperdício. 3. Mandioca - Indústria. 4. Farinhas - Indústria. I. Título.

CDU: 556.18:664.641

Dedico este trabalho com carinho aos meus pais, à minha irmã e à minha avó (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, por todas as bênçãos concedidas ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, Nelma Lima e Francisco Moraes, por me ensinarem o valor da educação em nossas vidas. Só tenho motivos para agradecer por todo amor e incentivo. Nós realizamos este sonho juntos!

À minha irmã, Camila Lima, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos.

À minha orientadora, Daniele Vich, por todo o conhecimento transmitido, pelas palavras de incentivo desde o nosso primeiro contato e pela confiança depositada em mim. Sou muito grata por tudo que conseguimos fazer juntas!

À minha co-orientadora, Karina Salomon, por aceitar a co-orientação e pela cooperação para que pudéssemos desenvolver a pesquisa. Muito obrigada!

Ao Prof. Dr. Theo Syrto e à Profa. Dra. Nelia Callado pelas contribuições valiosas.

Às minhas companheiras de mestrado e queridas amigas em Maceió, Valéria Carneiro, Ana Luíza Castro, Janiara Alves e Wanessa Ribeiro, pelo companheirismo em todos os momentos e pelas risadas na sala de permanência de PPGRHS.

Às minhas amigas em São Luís, Poena Silva, Mariana Uchôa, Isabelle Karyne e Isadora Queiroz, pelo estímulo desde os primeiros passos em direção à realização deste sonho.

Ao sr. Humberto do SEBRAE, por viabilizar a visita na casa de farinha em Estrela de Alagoas.

À Deise, Eunice e todos os produtores e administradores da casa de farinha pela colaboração e por todas as informações prestadas durante a visita.

Aos professores e colegas do PPGRHS, pela receptividade em Maceió e por todo o conhecimento trocado.

Aos meus queridos professores da Universidade Federal do Maranhão, Juliana Lima, Antônio Alves, Fernando Dias, Maxwell Lobato e Aline Figueiredo, pelo encorajamento para seguir na carreira acadêmica e apoio ao longo desta jornada.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigada!

A farinha tá no sangue do nordestino
Eu já sei desde menino o que ela pode dar
E tem da grossa, tem da fina, se não tem da quebradinha
Vou na vizinha pegar pra fazer pirão ou mingau [...]

[...] Você não sabe o que é farinha boa
Farinha é a que a mãe me manda lá de Alagoas
Você não sabe o que é farinha boa
Farinha é a que a mãe me manda lá de Alagoas.

FARINHA, de Djavan.

RESUMO

A cadeia de beneficiamento da mandioca é potencialmente sustentável e pode contribuir ativamente na mudança em direção à economia circular. Neste trabalho, objetivou-se avaliar as tendências mundiais acerca do tratamento da água residuária do processamento de mandioca e identificar oportunidades de melhorias na linha de produção de uma casa de farinha no Estado de Alagoas. Para compreender as tendências das pesquisas científicas, realizou-se uma análise bibliométrica sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária do processamento de mandioca utilizando a base de dados Scopus. Para verificar as oportunidades de Produção Mais Limpa, avaliou-se a gestão de água, resíduos, efluentes e energia e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em uma casa de farinha do Agreste alagoano. Os resultados mostraram que foram publicados 632 trabalhos sobre o tema ao longo de 41 anos. O interesse das pesquisas cresceu exponencialmente a partir de 2001 e está voltado principalmente para a recuperação de bioprodutos, tais como: metano, biogás, hidrogênio, bio-óleo, bioetanol, ácido propiônico e ácido butírico. O tratamento anaeróbio do efluente já alcançou a escala plena em países como Índia, China e Tailândia. Na casa de farinha, a compreensão dos fluxos de matéria e energia ao longo da cadeia produtiva permitiu identificar etapas com deficiência e apontar melhorias como o tratamento de efluentes, reúso da água residuária e substituição da fonte de energia térmica. No cenário melhorado, com aplicação da Produção Mais Limpa, houve diminuição de 25% do consumo de eletricidade e de 67% das emissões relacionadas à queima de biomassa para alimentar os fornos utilizados para torrar farinha. Ao final do trabalho, foi possível concluir que as dificuldades para adequar as soluções propostas nos trabalhos técnicos para a realidade do Agreste alagoano mostraram que ainda existem limitações na literatura relacionadas às tecnologias de tratamento voltadas para produção em escala pequena ou artesanal, sobretudo em zonas rurais.

Palavras-chave: Análise Bibliométrica; Água Residuária do Processamento de Mandioca; Produção Mais Limpa; Casa de Farinha.

ABSTRACT

The cassava processing chain has the potential to be sustainable and can actively contribute in changes to a circular economy. This study aimed to evaluate world trends regarding the treatment of wastewater from cassava processing and also identify improvement opportunities on the production line of a furnace house (also known as flour house) in Alagoas, a State in northeastern Brazil. In order to better understand the trends of scientific researches, a bibliometric analysis was performed on anaerobic digestion and biogas production from cassava processing wastewater using Scopus database. To verify the opportunities for Cleaner Production, it was made an assessment of water management, waste, effluents and energy and greenhouse gas emissions (GHG) in a furnace house located in the Agreste region of the State. The results showed that 632 papers on the subject were published over 41 years. Research interest has grown exponentially since 2001 and is mainly focused on the bioproducts recovery, such as methane, biogas, hydrogen, bio-oil, bioethanol, propionic and butyric acid. The effluent anaerobic treatment has already reached full scale in countries like India, China and Thailand. The understanding of matter and energy flows along the production chain identified steps with some deficiency in the furnace house. In the improved scenario, with the application of Cleaner Production, there was a 25% decrease in electricity consumption and 67% in emissions related to burning biomass that feeds the ovens used to toast flour. At the end of the work, difficulties were found to adapt the proposed solutions by technical works to the reality of Agreste region. This shows that there are still limitations in the literature related to treatment technologies applicable to small-scale production, especially in rural areas.

Keywords: Bibliometric Analysis; Wastewater from Cassava Processing; Furnace (Flour) House; Cleaner Production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Descrição da metodologia utilizada na análise bibliométrica.....	21
Figura 3.2 - Tipos de publicação sobre digestão anaeróbia e produção de biogás no período entre 1980 e 2020.	23
Figura 3.3 - Número acumulado de artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	24
Figura 3.4 - Áreas de estudo relacionadas com os artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	25
Figura 3.5 - Rede de colaboração entre os autores que assinaram os artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	29
Figura 3.6 - Rede de colaboração entre os países nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	33
Figura 3.7 - Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 1990.	35
Figura 3.8 - Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1991 e 2000.	36
Figura 3.9 - Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 2001 e 2010.	38
Figura 3.10 - Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 2011-2020.	41
Figura 3.11 - Áreas de estudo relacionadas com os artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020 produzidos por pesquisadores da Universidade.....	49
Figura 3.12 - Autores que publicaram artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020 produzidos por pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas.	51
Figura 3.13 - Rede de colaboração entre os pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas que assinaram os artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.....	51

Figura 4.1 - Mapa da distribuição da produção de mandioca no estado de Alagoas em 2019.	55
Figura 4.2 - Localização do município de Estrela de Alagoas, Alagoas, Brasil.	58
Figura 4.3 - Transporte das raízes (a) e descarregamento das raízes de mandioca descascadas na casa de farinha (b).	60
Figura 4.4 - Trituração das raízes (a) e depósito polpa de mandioca no tanque revestido de azulejos (b).	61
Figura 4.5 - Prensagem hidráulica da polpa de mandioca para produção de farinha na prensa hidráulica.	61
Figura 4.6 - Armazenamento da massa após a prensagem (a) e peneiramento (b).	62
Figura 4.7 - Torração da massa em fornos a lenha operados com pás mecânicas (a) e introdução de lenha embaixo dos fornos (b).	62
Figura 4.8 - Trituração da farinha torrada (a) e armazenamento em sacos de rafia (b).	63
Figura 4.9 - Cisterna com capacidade para 16 m ³ utilizada para armazenamento de água dos municípios do povoado de Lagoa da Coroa – Estrela de Alagoas.	64
Figura 4.10 - Manipueira despejada na superfície impermeabilizada utilizada para captação da água residuária (a) e tubulação utilizada para o despejo na área externa. ..	65
Figura 4.11 - Cascas e cepas de mandioca após o descascamento (a) e sólidos retidos no peneiramento (crueria) (b).	65
Figura 4.12 - Partículas sólidas em suspensão durante a torração da farinha (a) e cinzas da queima da lenha utilizada na torração (b).	66
Figura 4.13 - Menu geral da ferramenta de cálculo do GHG Protocol 2020.1.2 no Microsoft Excel.	68
Figura 4.14 - Estimativas das distâncias percorridas utilizando o Google Maps.	70
Figura 4.15 - Etapas da cadeia de beneficiamento da mandioca na casa de farinha de Estrela de Alagoas, Alagoas, Brasil.	75
Figura 4.16 - Fluxos de matéria e energia no processamento de 3 toneladas de mandioca para produção de farinha.	76
Figura 4.17 - Porcentagem do consumo anual de energia elétrica por etapa do processo no cenário base.	80
Figura 4.18 - Fluxos de matéria e energia no processamento de 3 toneladas de mandioca para produção de farinha no cenário melhorado.	91
Figura 4.19 - Porcentagem do consumo anual de energia elétrica por etapa do processo no cenário de melhoria.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Os 10 periódicos mais produtivos em pesquisas na área no período entre 1980 e 2020.	26
Tabela 3.2 - Os 10 autores mais produtivos em pesquisas sobre digestão anaeróbia, produção de biogás ou produção de metano a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	28
Tabela 3.3 - Os 30 países mais produtivos em pesquisas sobre digestão anaeróbia, produção de biogás ou produção de metano a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	30
Tabela 3.4 - As 20 instituições mais produtivas em pesquisas sobre digestão anaeróbia, produção de biogás ou produção de metano a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.	31
Tabela 3.5 - Artigos sobre digestão anaeróbia, produção de biogás ou produção de metano a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020 produzidos por pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas.	52
Tabela 4.1 - Fatores de emissão relacionados à utilização de lenha para queima direta.	68
Tabela 4.2 - Fatores de emissão por tipo de combustível utilizado no transporte.	69
Tabela 4.3 - Fator de conversão de metano referente ao tipo de tratamento aplicado. .	71
Tabela 4.4 - Fator de emissão médio mensal e consumo nos meses de agosto a novembro de 2019.	72
Tabela 4.5 - Fatores de emissão relacionados à utilização de lenha para queima direta.	73
Tabela 4.6 - Fator de conversão de metano referente ao tipo de tratamento aplicado. .	74
Tabela 4.7 - Fatores de emissão do combustível utilizado no transporte.	74
Tabela 4.8 - Emissões totais de GEE por categoria de emissões diretas e indiretas.	81
Tabela 4.9 - Consumo anual e emissões de GEE por tipo de combustível consumido na frota utilizada.	82
Tabela 4.10 - Emissões atribuídas ao consumo de eletricidade na casa de farinha de Estrela de Alagoas.	83
Tabela 4.11 - Emissões de CO ₂ biogênicas por categoria.	84
Tabela 4.12 - Emissões totais de GEE por categoria de emissões diretas e indiretas no cenário de melhoria.	94
Tabela 4.13 - Consumo anual e emissões de GEE por tipo de combustível consumido na frota utilizada no cenário de melhoria.	95
Tabela 4.14 - Emissões atribuídas ao consumo de eletricidade no cenário de melhoria.	95
Tabela 4.15 - Emissões de CO ₂ biogênicas por categoria no cenário de melhoria.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APL	Arranjo Produtivo Local
ASBR	Do inglês <i>Anaerobic Sequencing Batch Reactor</i>
ASBBR	Do inglês <i>Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor</i>
BNB	Bando do Nordeste
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
CE	Consumo de Energia Elétrica
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CIPAV	Do espanhol <i>Centro para la Investigacion en Sistemas Sostenibles de Produccion Agropecuaria</i>
CL	Consumo de Lenha
CMP	Capacidade Máxima de Produção de Metano
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Rios São Francisco e Parnaíba
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CSTR	Do inglês <i>Continuous Stirred-Tank Reactor Model</i>
CV	Cavalo vapor
DA	Digestão anaeróbia
D/C	Relação Diâmetro por Comprimento
DGGE	Do inglês <i>Denaturing Gradient Gel Eletrophoresis</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DP	Distância Percorrida
CVS	Do inglês <i>Comma-separated values</i>

EmGEE	Emissão de Gases de Efeito Estufa
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Do inglês <i>Food and Agriculture Organization</i>
FCM	Fator de Conversão para o Metano
FE	Fator de Emissão
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FISH	Do inglês <i>Fluorescence In Situ Hybridization</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Do inglês <i>Greenhouse Gases</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IWA	Do inglês <i>International Water Association</i>
PCR	Do inglês <i>Polymerase Chain Reaction</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico
RNA	Ácido Ribonucleico
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SIN	Sistema Interligado Nacional
SV	Sólidos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TMO	Total de Matéria Orgânica Presente na Manipueira
UASB	Do inglês <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2. CAPÍTULO 2: OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DE MANDIOCA NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 1980 E 2020.....	19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 METODOLOGIA	21
3.2.1 Base de dados	21
3.2.2 Extração e análise dos dados	22
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.2.1 Visão Geral	23
3.2.2 Áreas de estudo.....	24
3.2.3 Revistas.....	25
3.2.4 Autores.....	27
3.2.5 Países, instituições e colaboração internacional	30
3.2.6 Palavras-chave	34
3.2.7 Panorama das tendências da pesquisa sobre o tema na Universidade Federal de Alagoas	49
3.4 CONCLUSÃO	53
4. CAPÍTULO 4: DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE ÁGUA, RESÍDUOS, EFLUENTES E ENERGIA E QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSAMENTO DE RAÍZES DE MANDIOCA PARA PRODUÇÃO DE FARINHA NO ESTADO DE ALAGOAS.....	54

	15
4.1 INTRODUÇÃO	54
4.2 METODOLOGIA	58
4.2.1 Coleta de dados.....	58
4.2.2 Descrição da cadeia de produção da farinha na unidade de Estrela de Alagoas.....	58
4.2.3 Diagnóstico da gestão de água, efluentes, resíduos e energia elétrica na casa de farinha	64
4.2.4 Quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	66
4.2.4.2 Cálculo das emissões de gases de efeito estufa	67
4.2.5 Proposta de mitigação de impactos ambientais em um cenário de produção mais limpa	72
4.2.6 Balanço de massa e energia na cadeia de processamento de mandioca para produção de farinha	74
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.3.1 Gestão de água.....	77
4.3.2 Gestão de resíduos e efluentes	78
4.3.3 Gestão de energia elétrica e térmica	79
4.3.4 Emissões de gases de efeito estufa	81
4.3.5 Oportunidades para produção mais limpa	84
4.3.6 Cenários de aplicação das melhorias	90
4.4 CONCLUSÃO	96
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS	100

1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

A mandioca é uma das raízes mais consumidas no mundo. Esta é uma cultura arbustiva perene pertencente à família Euphorbiaceae que se destaca por se desenvolver eficientemente sob estresse hídrico e exposição direta ao sol (PINGMUANGLEK, JAKRAWATANA E GHEEWALA, 2017). Dada a excelente adaptação em condições climáticas diferentes, a mandiocultura está presente em mais de cem países tropicais e subtropicais e, entre 2012 e 2018, a produção mundial aumentou 6,1% (FAO, 2021).

Apesar da ampla expansão, a cadeia de beneficiamento do tubérculo está enfrentando desafios com a alta dos custos de matéria-prima, energia elétrica e gerenciamento de resíduos (OKWUONU et al., 2021; PADI E CHIMPHANGO, 2020a). Além disso, as pressões para diminuir os impactos ambientais do setor e adequá-lo às adaptações impostas pelas mudanças climáticas têm crescido em todo o mundo (GABRIEL et al., 2014; PADI E CHIMPHANGO, 2020b; TRAN et al., 2015).

As fábricas de processamento de mandioca geram volumes excessivos de água residuária (~300 L/t) com pH ácido (3,8 e 4,2), alta concentração de Demanda Química de Oxigênio (DQO) (6-70 g.DQO/L), ácido cianídrico (200 mg/L) e nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, manganês, ferro e sódio) (AMORIM et al., 2018a; COLIN et al., 2007; DA et al., 2008; SOUZA et al., 2014). Logo, a gestão adequada dos efluentes é um dos principais desafios para o setor.

Dado isso, diversos trabalhos analisaram a linha produtiva de fábricas de amido, fécula, chips e etanol e buscaram dar contribuições para o desenvolvimento da indústria em uma perspectiva de economia verde e de baixo carbono (OLUKANNI E OLATUNJI, 2018; SALLA et al., 2010; YIN et al., 2019). Neste caminho, as investigações têm se centrado em avaliar a geração de resíduos e efluentes e apontar um tratamento para os subprodutos, focando na recuperação de biorecursos que possam ser utilizados na planta de produção (ARAUJO et al., 2018; FLECK et al., 2017; PERES et al., 2019).

Assim, uma gama de produtos de valor econômico e ambiental (metano, hidrogênio, ácidos carboxílicos) foram recuperados a partir do tratamento anaeróbio em diferentes configurações de reatores e regimes de operação (AMORIM et al., 2018b; O-THONG et al., 2011; TONELLO et al., 2018; XIE et al., 2014), variando parâmetros chave para a Digestão Anaeróbia (DA) (temperatura, pH, alcalinidade) (CHAVADEJ et al., 2019; LUO, XIE E ZHOU, 2009; PALMA et al., 2018) em Tempos de Detenção

Hidráulica (TDH) distintos (KHONGKLIANG et al., 2017; SUVAJITTANONT E CHAIPRASERT, 2003; ZHANG et al., 2010).

No entanto, poucas pesquisas analisaram os processos e sugeriram alternativas que vão além das soluções de fim de tubo. Nesta direção, a abordagem voltada para o estudo mais detalhado das entradas e saídas ao longo de toda a linha de produção pode fornecer informações valiosas sobre cada uma das etapas e auxiliar na aplicação de melhorias focadas em aperfeiçoar a gestão de recursos em todo o processo (HANSUPALAK et al., 2016; JAKRAWATANA, PINGMUANGLEKA E GHEEWALA, 2016; ZHANG et al., 2016). Apesar de ter crescido nos últimos cinco anos, a aplicação deste tipo de diagnóstico em fábricas de processamento de mandioca ainda se encontra concentrada apenas em unidades de médio e grande porte, principalmente na produção de amido e sagu na Ásia e na África (HANSUPALAK et al., 2016; ISHOLA et al., 2013; SAWADOGO et al., 2018; WANG et al., 2017).

Neste sentido, nota-se que ainda existem muitas dificuldades para analisar e implementar melhorias com vistas à produção mais limpa em sistemas de produção e beneficiamento de mandioca, sobretudo em unidades de pequeno porte em países emergentes. Com base nesta discussão, este trabalho analisou sistematicamente a pesquisa científica sobre o tratamento anaeróbio da água residuária do processamento de mandioca no período de 1980 a 2020. Além disso, seguindo as principais tendências da literatura recente sobre o tema, o estudo avaliou *in loco* a produção de farinha de mandioca em uma unidade do Nordeste do Brasil e apontou potencialidades para melhorar a gestão de água, resíduos e efluentes. Para isto, o trabalho foi estruturado em seis capítulos, sendo eles:

Capítulo 1 – Introdução Geral;

Capítulo 2 – Objetivo Geral e Objetivos Específicos;

Capítulo 3 – Revisão bibliométrica sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária do processamento de mandioca no período compreendido entre 1980 e 2020;

Capítulo 4 – Diagnóstico da gestão de água, resíduos, efluentes e energia e quantificação das emissões de gases de efeito estufa no processamento de raízes de mandioca para produção de farinha no Estado de Alagoas;

Capítulo 5 – Conclusões Finais;

Capítulo 6 – Perspectivas para Trabalhos Futuros.

2. CAPÍTULO 2: OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar sistematicamente a pesquisa científica sobre o tratamento anaeróbio da água residuária do processamento de mandioca e acompanhar a produção de farinha em uma unidade no Estado de Alagoas para apontar potenciais melhorias na linha produtiva.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma análise bibliométrica e verificar a evolução das pesquisas sobre o tratamento anaeróbio da água residuária do processamento de mandioca;
- Examinar elementos chave para a análise sistemática da literatura e verificar as principais tendências da pesquisa sobre o assunto em períodos específicos;
- Acompanhar o processo de beneficiamento da mandioca para produção de farinha em uma unidade do Agreste alagoano e compreender como ocorre a gestão de água, resíduos, efluentes e energia elétrica;
- Quantificar a emissão de gases de efeito estufa de uma unidade de processamento de mandioca para produção de farinha;
- Identificar as oportunidades e desafios da implementação de melhorias na gestão de recursos, resíduos e efluentes na linha de produção analisada.

3. CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DE MANDIOCA NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 1980 E 2020.

3.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e o crescimento populacional acarretam em desafios globais relacionados ao atendimento da alta demanda energética, ao aumento da geração de resíduos, à escassez de fontes não renováveis e às mudanças climáticas (ALIBARDI et al., 2020). Assim, a transição de modelos de produção lineares para uma economia circular tem impulsionado a busca por alternativas que permitam a conversão de subprodutos de diferentes cadeias produtivas em bioprodutos de valor agregado (SOUSA E SILVA et al., 2020).

O aproveitamento de subprodutos agroindustriais visando a recuperação de recursos despertou grande interesse na última década, sobretudo após os incentivos governamentais concedidos depois do acordo de Paris (MAI-MOULIN et al., 2021; MURPHY E MCDONNELL, 2017). Dentre as tecnologias adotadas para conversão de resíduos e efluentes em energia destaca-se a digestão anaeróbia, que tem sido amplamente aplicada e aperfeiçoada com o objetivo de garantir a sustentabilidade técnica e econômica dos processos de tratamento (ALIBARDI et al., 2020; MENDIETA et al., 2020; RAJENDRAN E MURTHY, 2019).

Neste caminho, vários grupos de trabalho buscaram estudar a digestão da água residuária do processamento de mandioca (GAVAZZA et al., 2020; LANSCHÉ et al., 2020; MADEIRA et al., 2020). Embora tenha havido grande interesse em investigar a digestão do efluente, poucos estudos se dedicaram a analisar as publicações científicas de uma perspectiva global (MD KHUDZARI et al., 2018). Neste sentido, a análise bibliométrica é uma ferramenta útil para avaliar a produção e disseminação do conhecimento científico sobre um tema específico.

Esta análise consiste em um método sistemático de revisão de literatura para coletar dados secundários e avaliar criticamente as contribuições que os trabalhos deram à literatura técnica sobre o objeto estudado (LIU, ZHANG E HONG, 2011; TSAI et al., 2020). Neste tipo de investigação é possível verificar as produções mais relevantes sobre um assunto, examinar em quais áreas do conhecimento estão as publicações sobre o tema, compreender padrões regionais e globais destas publicações e conhecer a rede de

colaboração entre autores (HASSAN, KAMDEM E TEIXEIRA DA ROCHA, 2020; WEST E MCILWAINE, 2002). Além disso, a análise das palavras-chave utilizadas nos trabalhos permite realizar um mapeamento das principais tendências nas pesquisas realizadas em um determinado período (PAI E ALATHUR, 2021; YEUNG ET AL., 2020).

Os resultados de estudos bibliométricos podem contribuir para identificar as lacunas e os desafios da pesquisa científica relacionada ao objeto estudado, orientar trabalhos futuros e auxiliar a implementação de práticas posteriores, como por exemplo o aumento da escala experimental (TSAI et al., 2020).

Seguindo esta linha, trabalhos recentes buscaram utilizar este método para examinar diferentes assuntos. Lora Grandó et al. (2017) realizaram um estudo bibliométrico sobre a pesquisa e desenvolvimento da produção de biogás na Europa, já Md Khudzari et al. (2018) estudaram o direcionamento global das investigações sobre células a combustível microbianas, e Mao et al. (2020) avaliaram as tendências das pesquisas acerca do tratamento de águas residuárias industriais no período de 1998 a 2019.

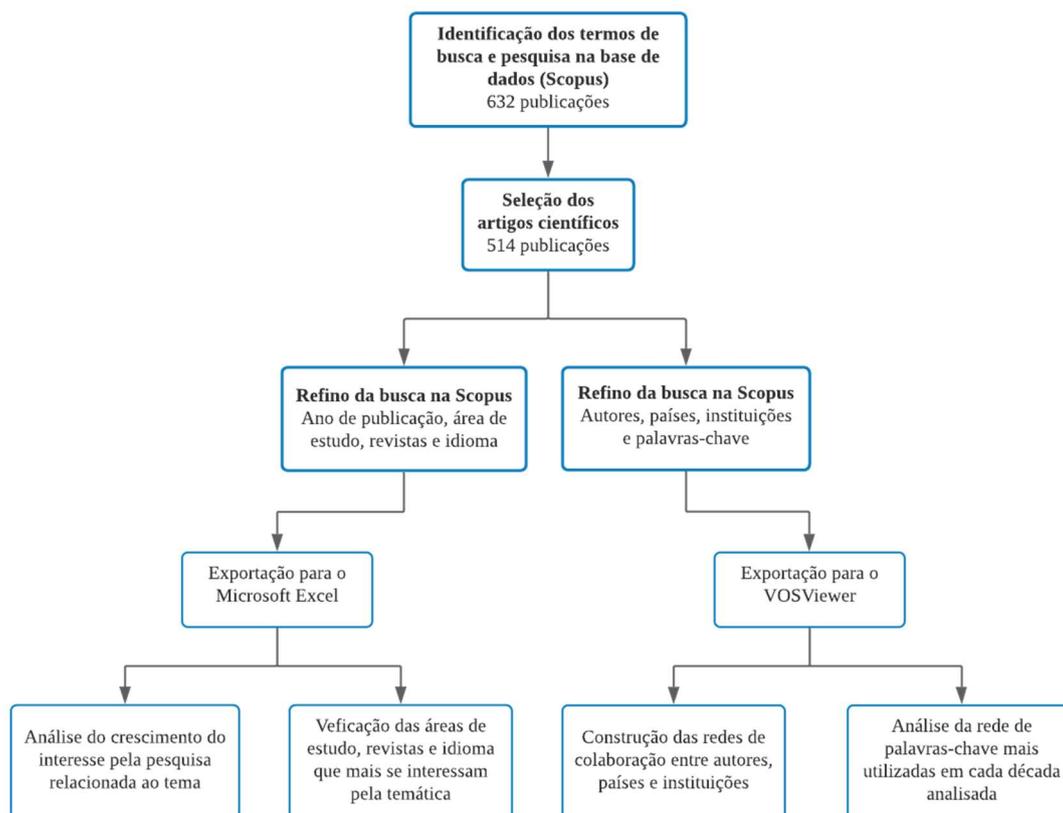
Quanto às bases de dados, pesquisas que comparam as mais utilizadas, *Web of Science* e Scopus, mostram que seus bancos de dados se diferenciam (GONZÁLEZ DE DIOS, ALONSO-ARROYO E ALEIXANDRE-BENAVENT, 2019; SÁNCHEZ et al., 2017). A Scopus apresenta um volume maior de dados e cobertura de mais revistas e autores em comparação com *Web of Science* (SÁNCHEZ, et al., 2017). Logo, a Scopus tem sido mais utilizada nos artigos que buscam abordar a análise bibliométrica (JAMWAL et al., 2020; MALANSKI, DEDIEU E SCHIAVI, 2020; MD KHUDZARI et al., 2018).

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária do processamento de mandioca, utilizando a base de dados Scopus. O estudo objetivou examinar elementos chave para a análise sistemática da literatura e verificar as tendências da pesquisa sobre o assunto em períodos específicos por meio da análise de *clusters*.

3.2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa, termos relacionados com o tema estudado foram utilizados como entrada na busca das publicações na Scopus. As características gerais dos artigos foram analisadas usando o Microsoft Excel. O *software* VOSViewer foi usado para avaliar as palavras-chave mais utilizadas nas publicações, bem como a rede de parceria entre autores e países. A metodologia seguiu o fluxograma apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Descrição da metodologia utilizada na análise bibliométrica.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.1 Base de dados

A base de dados da Scopus (Elsevier) hospedada no portal Periódicos CAPES (<https://www-scopus-com.ez9.periodicos.capes.gov.br/search/>) foi utilizada na coleta de publicações relacionadas ao estudo. A base de dados reúne periódicos revisados por pares publicados em revistas científicas de diversas áreas. A busca foi realizada em setembro de 2020 usando as seguintes *strings* booleanas: “*Cassava*” AND “*Wastewater*” OR “*Anaerobic Digestion*” OR “*Biogas Production*” OR “*Methane Production*”.

No primeiro momento não foram usadas restrições à busca, como tipo de publicação, ano ou revista. A sequência de pesquisa retornou publicações com a combinação de termos em seus títulos, resumos, palavras-chave e/ou corpo do texto. Na sequência, a busca foi refinada para selecionar apenas artigos científicos.

3.2.2 Extração e análise dos dados

As características gerais dos artigos foram analisadas a partir da contagem de frequência do Scopus. Nesta etapa, os dados foram exportados para o Microsoft Excel e os parâmetros analisados foram: ano de publicação, tipo de publicação, área de estudo e idioma.

Os registros bibliométricos foram exportados em formato CSV e utilizados como entrada no VOSViewer (versão 1.6.15), um *software* de acesso livre desenvolvido por Van Eck e Waltman (2010) para construção de mapas, redes e *clusters* que tem sido amplamente utilizado para levantamentos bibliométricos (MD KHUDZARI *et al.*, 2018; TSAI *et al.*, 2020; YEUNG *et al.*, 2020). Para análise elaborada no *software*, foram selecionadas as informações de co-autoria (autores, países, instituições) e co-ocorrência (palavras-chave).

A extração e análise de todos os parâmetros mencionados foram executadas primeiramente utilizando todo o período estudado (1980 – 2020) e depois separando-os por décadas (1980 – 1990; 1991 – 2000; 2001 – 2010; 2011 – 2020) para verificar as especificidades de cada uma.

Ressalta-se que na análise referente às áreas de conhecimento considerou-se a contagem de frequência da Scopus, onde um artigo pode estar enquadrado em mais de uma área de estudo.

Em relação aos países e instituições, a base de dados considera as informações referentes a cada um dos autores e co-autores da publicação. Logo, um artigo pode estar relacionado com mais de um país ou instituição.

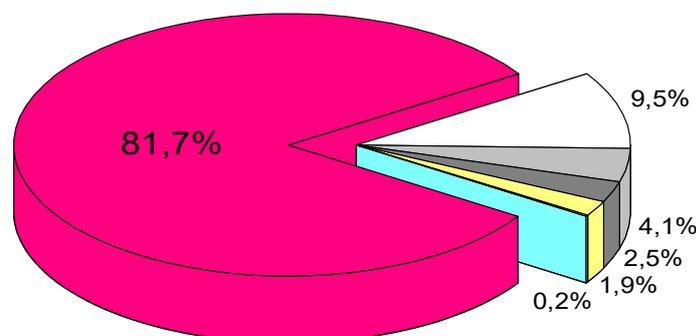
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram encontradas 632 publicações sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020. Os resultados a seguir mostram as principais áreas do conhecimento, autores, revistas, países e instituições que publicaram artigos científicos sobre o tema. Além disso, é realizada uma discussão sobre as principais características das publicações em cada uma das quatro décadas examinadas.

3.2.1 Visão Geral

Os trabalhos estão distribuídos em nove tipos de publicação. Dentre eles, 514 são artigos científicos (81,7%), 60 artigos de conferência (9,5%), 26 revisões (4,1%), 16 revisões de conferência (2,5%), 12 capítulos de livro (1,9%), 1 livro (0,2%), 1 pesquisa curta (0,2%), 1 nota (0,2%), 1 artigo de retratação (0,2%) (Figura 3.2). Os resultados apresentados nos próximos parágrafos referem-se apenas aos artigos científicos.

Figura 3.2 - Tipos de publicação sobre digestão anaeróbia e produção de biogás no período entre 1980 e 2020.

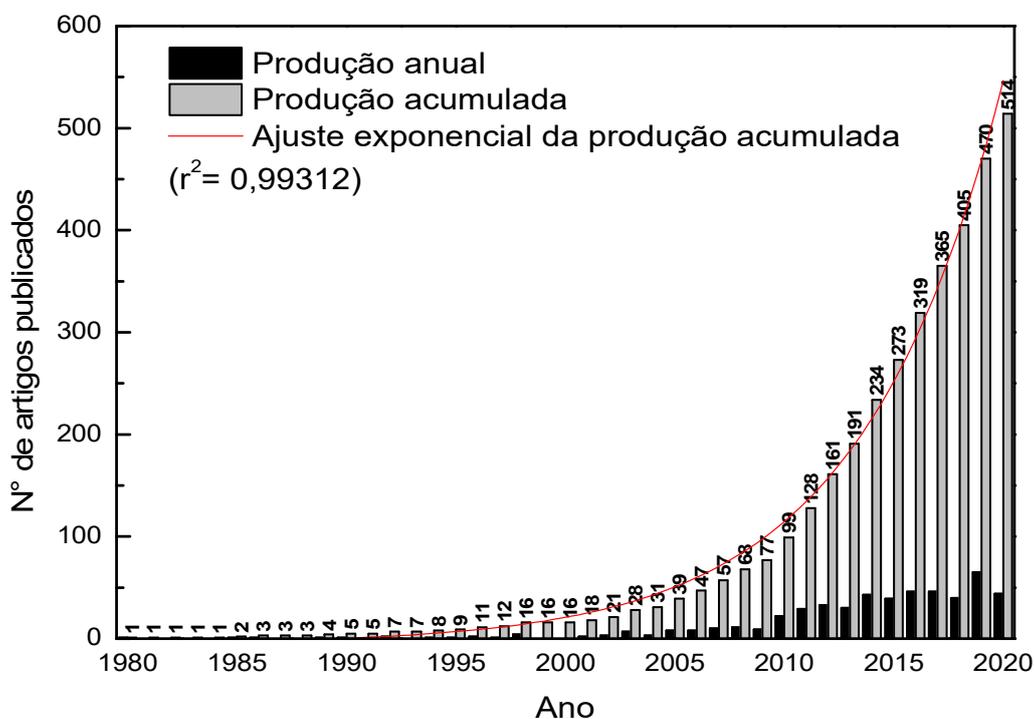


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dos 514 artigos publicados, apenas 132 têm o acesso livre e 382 necessitam que o usuário pague para obter acesso. O inglês foi utilizado em 477 (91,4%) artigos, seguido do português (29; 5,6%), chinês (10; 1,9%) e espanhol (6; 1,1%). O domínio da língua inglesa pode ser atribuído ao fato de um dos pré-requisitos para indexação do trabalho na Scopus ser possuir título e resumo em inglês (MD KHUDZARI et al., 2018).

O primeiro trabalho sobre a temática foi publicado em 1980 e indicava a utilização da biomassa produzida no setor agrário alemão para gerar energia por meio da produção de biogás (JÜRGENS-GSCHWIND, 1980). O artigo seguinte relacionado ao tema só foi publicado cinco anos depois e, até o fim da primeira década, foram publicados somente mais três, totalizando 5 artigos. O interesse na pesquisa relacionada à temática começou a crescer exponencialmente a partir de 2001 (Figura 3.3). O número acumulado de artigos publicados por ano no período de 1980 a 2020 foi ajustado a um modelo exponencial com um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9923$). Sugere-se, portanto, que 51 artigos relacionados ao tema poderão ser publicados em 2021 e o número continuará crescendo nos próximos anos.

Figura 3.3 - Número acumulado de artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.



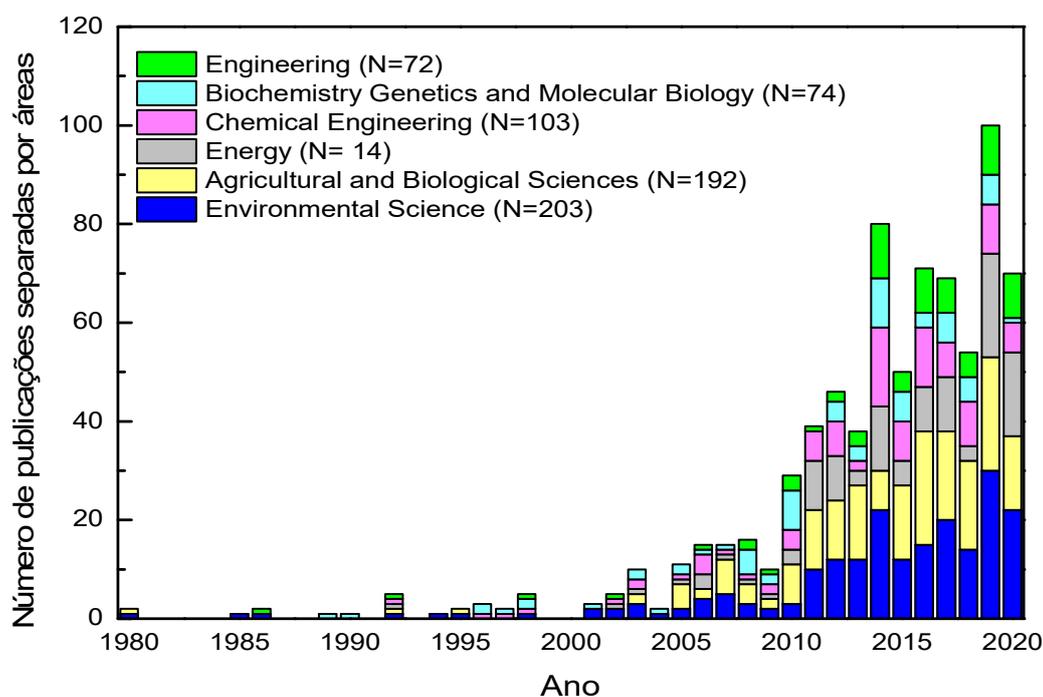
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.2 Áreas de estudo

As áreas de estudo dominantes, ilustradas na Figura 3.4, são ciências ambientais (203; 32,1%), ciências agrárias e biológicas (192; 30,4%), energia (114; 18,0%), engenharia química (103; 16,3%) e genética da bioquímica e biologia molecular (74; 11,7%). Porém, ressalta-se que as categorias da Scopus não limitam os artigos a apenas uma área, fazendo com que uma publicação possa estar relacionada a diversas áreas do

conhecimento, a exemplo do artigo “Produção de metano por co-digestão da polpa de mandioca com várias concentrações de esterco de porco” (PANICHNUMSIN et al., 2010) classificado dentro de três áreas: ciências agrárias e biológicas, energia e ciências ambientais.

Figura 3.4 - Áreas de estudo relacionadas com os artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Notadamente, este é um tema multidisciplinar que desperta interesse em linhas de pesquisa ligadas às áreas de ambiente, energia e engenharias. Todavia, também é objeto de estudo de outras áreas, como gestão e contabilidade (15; 2,9%), ciências sociais (12; 2,3%) e enfermagem (6; 1,2%), com pesquisas envolvendo estratégias de gestão para aumentar a eficiência energética em indústrias de processamento de mandioca (VIANA, DÜSMAN E VICENTINI, 2014), o tratamento de efluentes em comunidades rurais (OMOJARO, 2011) e mutagenicidade e citotoxicidade da manipueira (YIN et al., 2019).

3.2.3 Revistas

Os dez periódicos mais relevantes (Tabela 3.1) são responsáveis por 31,5% da produção sobre o tema no período de 1980 a 2020. Os artigos foram publicados por cinco editoras: *Elsevier*, *Scielo*, *Fundación Centro para la Investigacion en Sistemas Sostenibles de Produccion Agropecuaria* (CIPAV), *IWA Publishing* e *Scimago*.

A maior produção de artigos está atribuída ao periódico *Livestock Research For Rural Development* (Pesquisa Pecuária para o Desenvolvimento Rural) publicado pela *Fundación CIPAV*, com 47 publicações e, em segundo lugar, ao *Bioresource Technology* (Tecnologia de Biorecursos) da Elsevier, com 26 artigos. O último também foi o periódico mais citado (402 citações) e possui as maiores métricas de produção acadêmica da lista: Fator de Impacto (*Journal Impact Factor*) = 7,53 e *CiteScore* = 12,8. O *CiteScore* mede o impacto da citação de periódicos, conferências, séries de livros e periódicos comerciais cobertos no banco de dados Scopus, já o *Journal Impact Factor* mede o impacto das citações em outra base de dados, a *Web of Science*.

Além destes, outros três periódicos possuem notável produção acadêmica com Fator de Impacto e *CiteScore* acima de 5 em 2019 (Tabela 3.1). As revistas brasileiras de Engenharia Agrícola e de Engenharia Agrícola e Ambiental estão na 3^a. e 4^a. colocações com relação à publicação de artigos relacionados à temática, mas ao analisar as métricas de produção encontram-se na 8^a e 9^a posições.

Tabela 3.1 - Os 10 periódicos que publicaram o maior número de trabalhos na área no período entre 1980 e 2020.

#	Revistas	Total de Publicações	Citações	Fator de Impacto 2019	<i>CiteScore</i> 2019	Editora
1	<i>Livestock Research For Rural Development</i>	47	47	0,5	0,8	<i>Fundación CIPAV</i>
2	<i>Bioresource Technology</i>	26	402	7,5	12,8	<i>Elsevier</i>
3	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	15	24	0,6	1,4	Scielo
4	Engenharia Agrícola	14	17	-	1,1	Scielo
5	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	14	218	4,9	8,0	<i>Elsevier</i>
6	<i>Journal of Cleaner Production</i>	12	91	7,2	10,9	<i>Elsevier</i>
7	<i>Water Science and Technology</i>	12	56	1,2	2,9	<i>IWA Publishing</i>
8	<i>Environmental Technology United Kingdom</i>	7	146	1,8	3,4	<i>Taylor & Francis</i>
9	<i>Renewable Energy</i>	7	130	6,3	11,2	<i>Elsevier</i>
10	<i>Tropical Animal Health and Production</i>	6	57	0,8	1,3	<i>Italian Association of Chemical Engineering</i>

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O grande número de trabalhos nos dois periódicos pode estar relacionado com a alta disponibilidade e o expressivo cultivo de mandioca no Brasil, o que desperta o interesse dos pesquisadores nacionais. Contudo, os dois periódicos também possuem

publicações em português, o que torna os trabalhos menos acessíveis e os leva a ter métricas mais baixas, a exemplo dos artigos publicados em outras línguas menos difundidas na comunidade científica, como o chinês (MD KHUDZARI et al., 2018). Porém, atualmente os dois periódicos aceitam trabalhos apenas em inglês.

3.2.4 Autores

Vários autores participaram de pesquisas sobre o tema. Os 514 artigos foram assinados por 1.577 autores. Destes, 319 publicaram pelo menos dois trabalhos, 128 três, 67 quatro e 42 cinco.

Dos dez autores mais influentes, Preston, T.R. publicou mais trabalhos, com 42 documentos na área, 1.358 citações e índice h 16 (referentes a todas as publicações do autor em diferentes áreas), seguindo de Leng, R. A. com 22 trabalhos, mais que o triplo de citações (4.425) e índice h 36. Empatado com Leng, R.A. na segunda posição está Gomes, S.D., com 22 trabalhos, 467 citações, índice h 16. O índice h relaciona o número de artigos publicados e o número de citações que o autor recebeu (SZETO et al., 2020).

Os mais citados são Pastore, G.M., com 5.795 citações e índice-h 43 e Zhou, Q., com 5.603 citações e índice-h 39. Quanto à nacionalidade dos mais influentes na área, os chineses e brasileiros ocupam juntos 70% da lista (Tabela 3.2). Os chineses também se destacam em relação à rede de colaboração formada pelos pesquisadores desta linha de pesquisa. O mapa construído no VOSViewer (Figura 3.5) mostra a rede de colaboração formada por diversos autores por meio de caixas conectadas. A caixa representa o autor, o tamanho da caixa mostra o número de publicações e as linhas mostram os links de co-autoria. Os níveis de colaboração podem ser verificados pela espessura das linhas conectando as caixas.

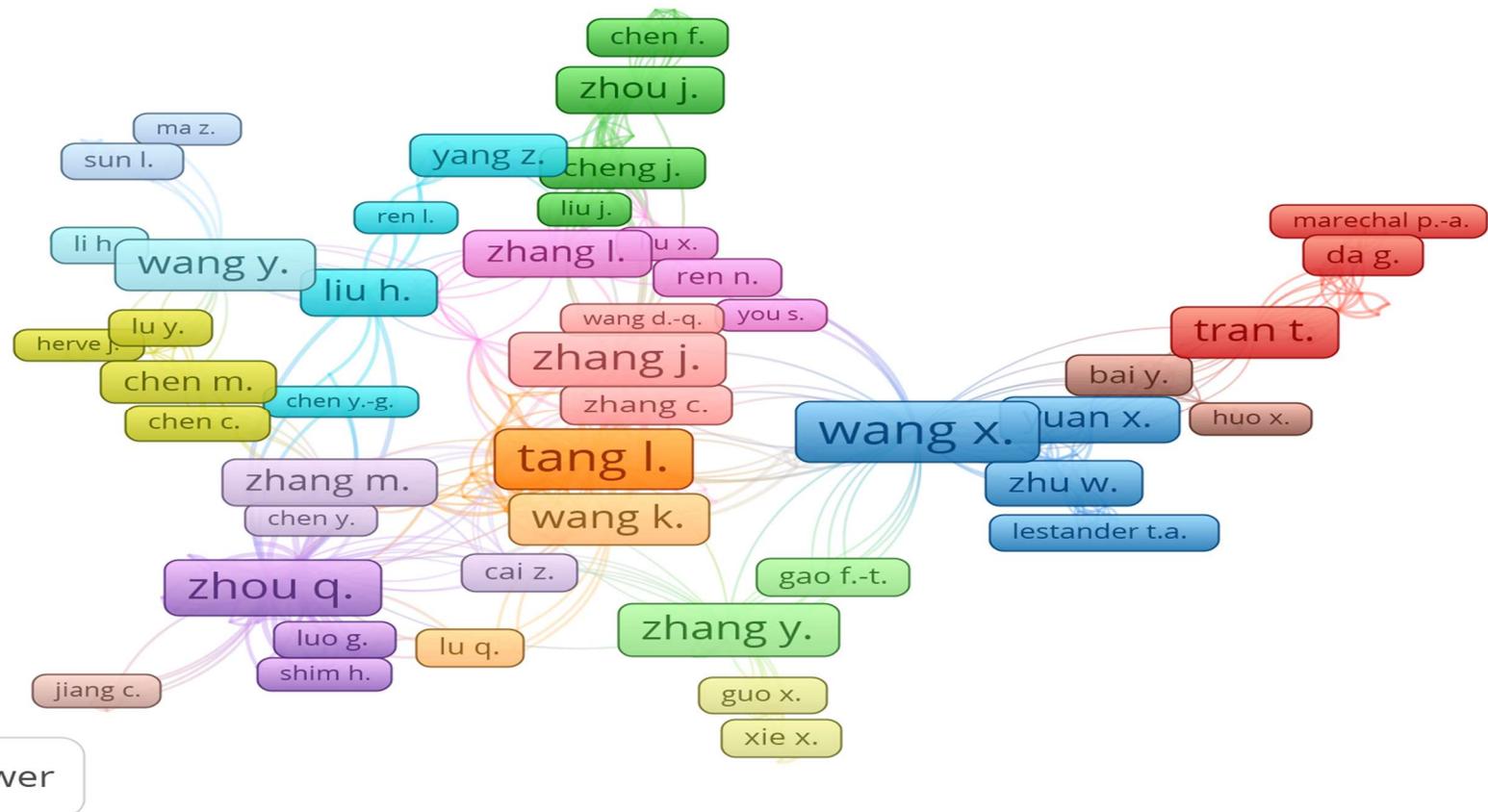
Contudo, ressalta-se que ao evidenciar os sobrenomes, a análise pode ser prejudicada devido a existência de sobrenomes e nomes idênticos, sobretudo na Ásia. Há ainda casos onde o(a) mesmo(a) autor(a) muda de sobrenome (ex.: casamento) e entra na contabilização como pessoas diferentes (CHEN et al., 2016). Portanto, a identificação dos autores por um número de identificação é mais segura, como é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Os 10 autores que publicaram o maior número de trabalhos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.

#	Autores	ID Scopus	Total de publicações	h-index	Total de citações	Ano da primeira publicação	Instituição	País
1	PRESTON, T.R.	55067842000	42	16	1.358	2006	CIPAV	Colômbia
2	GOMES, S.D.	23984693000	22	12	467	2008	Universidade Estadual do Oeste do Paraná	Brasil
2	LENG, R.A.	7005840637	22	36	4.425	1991	Universidade da Nova Inglaterra	Austrália
4	INTHAPAN, S.	35179755300	19	9	258	2009	Universidade Souphanouvong	China
5	ZHOU, Q.	56497343100	15	39	5.603	2001	Universidade Tongji	China
6	XIE, L.	56929663200	14	16	1.166	2008	Universidade Tongji	China
7	ROLIM, M.M.	21743450800	12	12	507	2001	Universidade Federal Rural de Pernambuco	Brasil
8	TANG, L.	36446926600	12	16	815	2008	Universidade Jiangnan	China
9	PASTORE, G.M.	7102231043	11	43	5.795	1993	Universidade Estadual de Campinas	Brasil
10	KHANG, D.N.	47161328900	10	6	88	2000	Universidade Nong Lam	Vietnã

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 3.5 - Rede de colaboração entre os autores que assinaram os artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residual de mandioca no período entre 1980 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.5 Países, instituições e colaboração internacional

Dos 514 artigos publicados sobre o tema, dois não reportaram o país dos autores e foram excluídos desta análise. O interesse sobre a utilização da água residuária de mandioca em processos anaeróbios para produção de biogás esteve presente nos 5 continentes. 51 países publicaram pelo menos um artigo relacionado ao tema, 21 pelo menos cinco e 12 publicaram pelo menos dez (Tabela 3.3). Dentre os 512 artigos, 2/3 foram publicados por três países: Brasil (32%), China (16%) e Tailândia (14%). Os três também são os mais citados na literatura internacional.

Tabela 3.3 - Os 30 países que publicaram o maior número de trabalhos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.

#	País	Documentos	Citações	#	País	Documentos	Citações
1	Brasil	167	1869	16	França	7	171
2	China	84	1271	17	Camboja	7	36
3	Tailândia	74	1244	18	Dinamarca	6	174
4	Colômbia	52	498	19	Canadá	6	246
5	Nigéria	43	581	20	Malásia	5	15
6	Vietnã	34	203	21	Suécia	5	116
7	Austrália	23	297	22	Países Baixos	4	34
8	Laos	23	247	23	Egito	4	126
9	Índia	16	194	24	Taiwan	4	152
10	Japão	11	434	25	Omã	3	11
11	EUA	10	48	26	Tanzânia	3	66
12	Reino Unido	10	290	27	Cuba	3	56
13	África do Sul	9	70	28	Miamar	3	0
14	Alemanha	9	81	29	Uganda	3	4
15	Indonésia	8	64	30	Espanha	3	56

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao analisar as dez nações mais produtivas na temática, constata-se que nove delas estão localizadas na África, na Ásia ou na América do Sul. Notadamente, o continente africano é o maior produtor de mandioca do mundo, produção essa liderada pela Nigéria. Os países do Sudeste Asiático e da América do Sul também são grandes produtores da raiz tuberosa, com destaque para o volume produzido na Tailândia, Indonésia e Brasil (CEPEA, 2019). Acredita-se, portanto, que a alta produção de farinha, polvilho, fécula,

chips e até biocombustíveis utilizando mandioca como matéria-prima nestes países relaciona-se com o maior interesse em pesquisas para conhecer os subprodutos gerados nos processos, propor soluções e diminuir o impacto ambiental das cadeias produtivas. As investigações científicas vão desde as pequenas fábricas de processamento de mandioca nigerianas até o robusto sistema tailandês de produção de etanol (OLUKANNI E OLATUNJI, 2018; SILALERTRUKSA E GHEEWALA, 2011).

Além disso, a presença de quatro das maiores economias emergentes do mundo (Brasil, China, Índia e África do Sul) na lista mostra que os países em crescimento têm investido em aliar a industrialização crescente à produção mais limpa, na tentativa de tornarem-se mais competitivos comercialmente ao se alinharem às políticas de economia verde impostas por países desenvolvidos (SHAHBAZ et al., 2016; WANG, BUI E ZHANG, 2020).

Com relação às filiações ligadas aos autores dos trabalhos (Tabela 3.4), as universidades e centros de pesquisa brasileiros ocupam 10 das 20 posições das instituições com maior número de publicações, com destaque para as universidades das regiões Sudeste e Sul do Brasil, que juntas publicaram 125 trabalhos.

Tabela 3.4 - As 20 instituições que publicaram o maior número de trabalhos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.

#	Instituição	Total De documentos	País
1	Universidade do Oeste do Paraná	40	Brasil
2	Universidade da Nova Inglaterra	23	Austrália
3	Universidade de Hue	21	Vietnã
4	Universidade de Tongji	22	China
5	Universidade de Jiangnan	20	China
6	Centro de Investigação em Sistemas Sustentáveis de Produção Agropecuária	19	Colômbia
7	Universidade Khon Kaen	19	Tailândia
8	Universidade de São Paulo	18	Brasil
9	Universidade Rural de Pernambuco	17	Brasil
10	Universidade Chulalongkorn	17	Tailândia
11	Universidade Nong Lam	27	Vietnã
12	Universidade Souphanouvong	16	Tailândia
13	Universidade Estadual Paulista	16	Brasil
14	Universidade Tecnológica Thonburi	15	Tailândia
15	Universidade Federal do Paraná	15	Brasil
16	Universidade Estadual de Campinas	14	Brasil
17	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	13	Brasil
18	Universidade Federal de Santa Catarina	11	Brasil
19	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	11	Brasil
20	Universidade Federal de Campina Grande	10	Brasil

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No sul do país, o estado do Paraná, segundo maior produtor de mandioca brasileiro (EMBRAPA, 2018), investiu massivamente no aproveitamento energético de resíduos agroindustriais por meio da metanização e já possui sistemas anaeróbios em escala plena tratando resíduos como dejetos suínos e restos de poda (ANGONESE et al., 2006; FERREIRA et al., 2018).

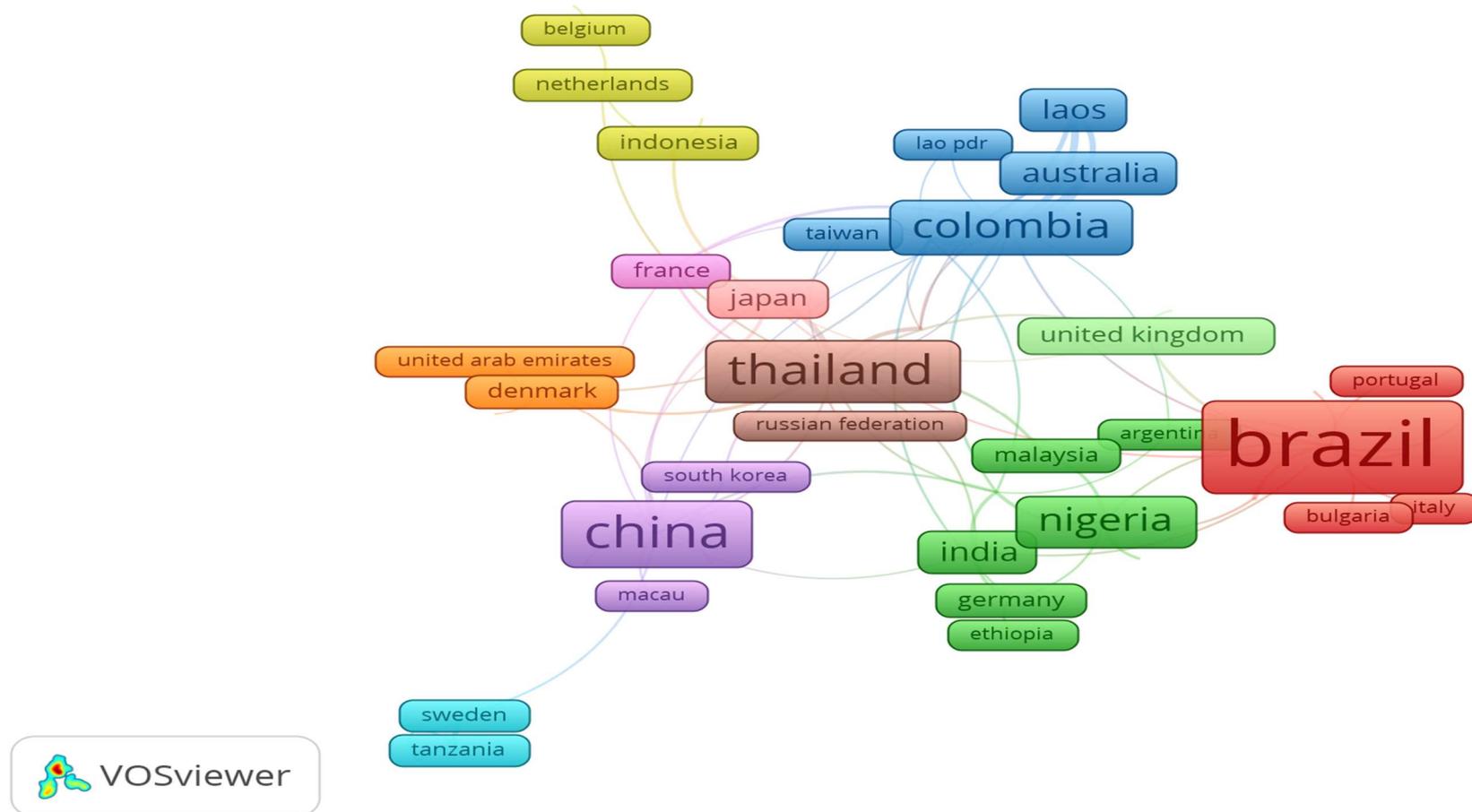
O investimento na pesquisa ajudou a amadurecer iniciativas estaduais e tem fortalecido a cadeia do biogás do país. Atualmente, o estado conta com o conjunto de leis e incentivos à produção mais limpa mais amadurecido do Brasil, e desde 2001 as águas residuárias das fábricas de fécula, principal produto do processamento da raiz no Estado, têm sido objeto de estudo em trabalhos sobre digestão anaeróbia (FREITAS et al., 2019; LUCAS et al., 2015; MADEIRA et al., 2017b; OLIVEIRA, REIS & NOZAKI, 2001).

Quanto à colaboração internacional, Colômbia, Vietnã e Austrália foram os países que mais colaboraram com outras nações (Figura 3.6). A troca de informações e conhecimento entre pesquisadores de diferentes centros de pesquisa não se limita a expansão das redes de trabalho, mas também ajuda a alavancar e evidenciar os grupos de pesquisa (MD KHUDZARI et al., 2018).

Apesar de não figurar entre os principais países produtores ou consumidores de produtos oriundos da mandioca, a Austrália é o sétimo no ranking do total de publicações e o sexto no de citações (Tabela 3.3), fato esse relacionado diretamente com a colaboração de pesquisadores australianos da Universidade da Nova Inglaterra com o Centro de Investigação em Sistemas Sustentáveis de Produção Agropecuária na Colômbia em todos os trabalhos onde há filiação australiana.

No mapa construído no VOSViewer (Figura 3.6) a conexão entre as caixas mostra a rede de colaboração internacional formada pelos países. A caixa representa o país, o tamanho da caixa mostra o número de publicações de autores de instituições deste país e as linhas mostram os links de co-autoria entre países. Os níveis de colaboração podem ser verificados pela espessura das linhas que os conectam.

Figura 3.6 - Rede de colaboração entre os países nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.6 Palavras-chave

A análise de palavras-chave ganhou atenção especial recentemente (HASSAN, KAMDEM E TEIXEIRA DA ROCHA, 2020; SÁNCHEZ, LA CRUZ DEL RÍO RAMA, GARCÍA, 2017; YEUNG et al., 2020). Ela pode ajudar a compreender a evolução dos estudos de uma determinada área e analisar a tendência dos temas explorados.

Ao examinar os 514 artigos com o auxílio do VOSViewer, verificou-se que 1.397 palavras-chave foram usadas pelo menos duas vezes, 143 três, 84 quatro e 56 cinco. O interesse das pesquisas relacionadas ao tema ao longo dos 41 anos esteve voltado principalmente para a recuperação de recursos, tais como: metano (8%; 111), biogás (7%; 92); hidrogênio (5%; 69), bio-óleo (1%; 20), bioetanol (1%; 20), ácido propiônico (1%; 15) e ácido butírico (1%; 13).

Os substratos mais utilizados foram água residuária da indústria de fécula/amido (6%; 81), efluentes da produção de etanol a partir da mandioca (4%; 58), manipueira (1%; 9), cascas de mandioca (1%; 9) e bagaço de mandioca (1%; 7).

Os estudos focaram em objetivos diferentes, dentre os quais destacam-se a remoção do cianeto (2%; 26), estudo da comunidade microbiana (1%; 13) e otimização de parâmetros chave para a digestão anaeróbia, como: pH (4%; 49), alcalinidade (1%; 12), temperatura (1%; 12), carga orgânica volumétrica (1%; 9) e tempo de detenção hidráulica (0,5%; 7).

Verificou-se também que os autores buscaram contribuir com as agendas ambientais globais por meio de investigações relacionadas à emissão de gases de efeito estufa (3%; 40), bioenergia (1%; 20) e mudanças climáticas (1%; 12).

Para verificar como se deu o crescimento do interesse científico pelo tema e quais foram os resultados obtidos ao longo do tempo, a análise a seguir refere-se à quatro períodos distintos: 1980-1990; 1991-2000; 2001-2010 e 2011-2020.

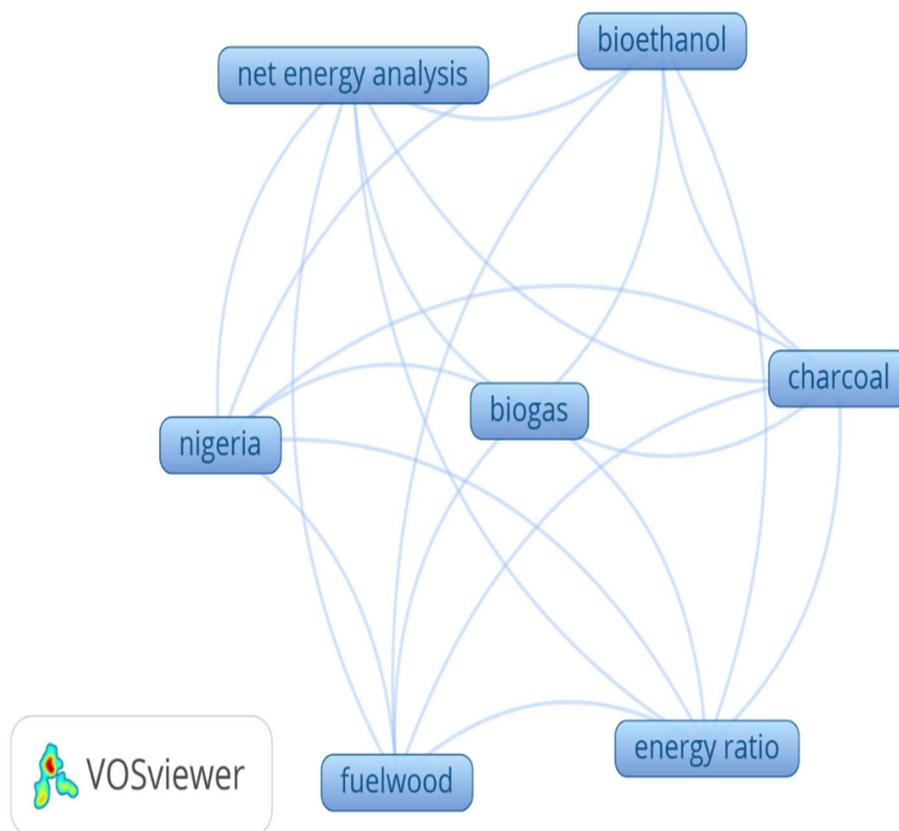
3.2.6.1 1980-1990

Em um período de 11 anos foram publicados cinco artigos sobre a temática e o VOSViewer indicou que 12 palavras-chave foram utilizadas pelos autores. Cada uma foi usada apenas uma vez e estão igualmente interligadas entre si (Figura 3.7). As publicações deste período começaram as discussões acerca da utilização de biomassa ou resíduos agrários para gerar energia.

No início da década de 80, uma publicação alemã tratando sobre o uso da fertilização mineral para aumentar a produtividade de terras usadas para fins energéticos

indicou, pela primeira vez, a utilização da biomassa produzida no setor agrário para gerar energia por meio da produção de biogás (JÜRGENS-GSCHWIND, 1980).

Figura 3.7 - Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 1990.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

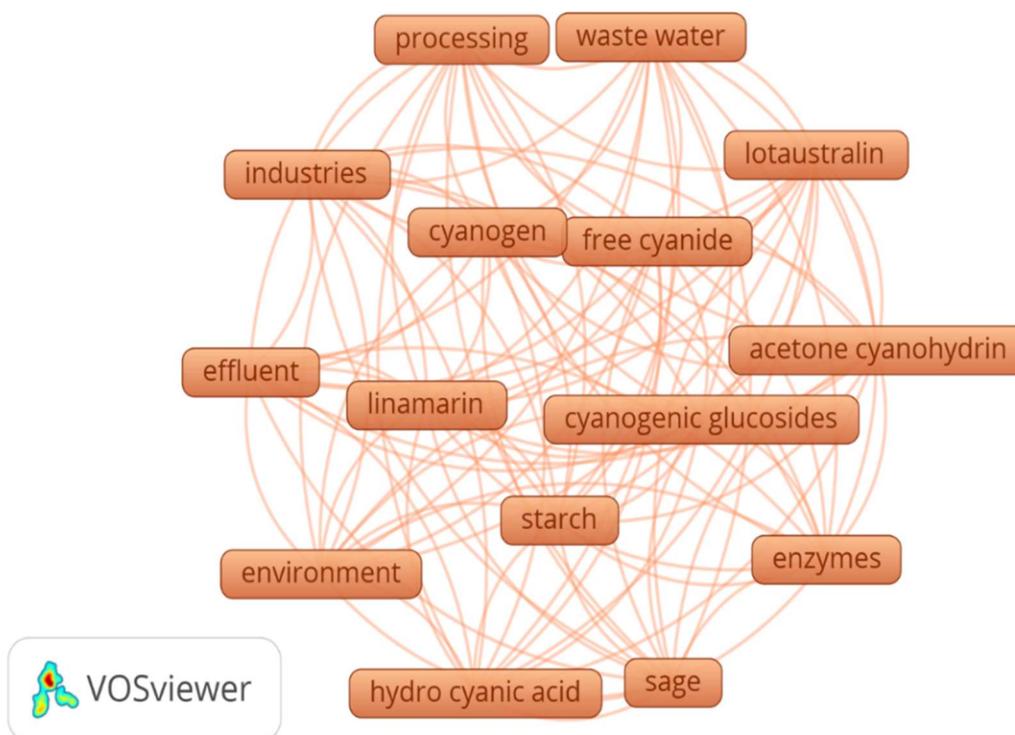
Cinco anos depois, dois estudos indicaram que a mandioca e os resíduos e efluentes do processamento da raiz têm potencial para produzir bioetanol a partir da digestão anaeróbia (NWACHUKWU E LEWIS, 1986; WURSTER, 1985).

Na Índia, Jamuna e Ramakrishna (1989) usaram culturas fermentativas (*E. fibuligea*, *C. tropicalis* e *Saccharomyces* sp.) no tratamento do efluente da indústria de amido de mandioca em um frasco reator de bancada (5 L) em condições anaeróbias. O processo removeu 50% da DQO. Já Manilal, Narayanan e Balagopalan (1990) testaram reatores em batelada e semi-contínuos (2 L) no tratamento de águas residuárias da produção de amido. O reator em batelada obteve os melhores resultados: 130 L biogás/kg_{matériaseca} com um teor médio de 54% de CH₄ e remoção de 64% de DQO ao longo de 60 dias de operação.

3.2.6.2 1991-2000

Na década de 90 foram publicados 11 artigos sobre o tema e o VOSviewer indicou que foram usadas 37 palavras-chave pelos autores durante o período (Figura 3.8). Em suma, as publicações objetivaram caracterizar e remover o cianeto de hidrogênio da água residuária do processamento de mandioca.

Figura 3.8 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1991 e 2000.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Sudeste Asiático, observou-se que o cianeto de hidrogênio presente no efluente do processamento da mandioca representava uma ameaça às lavouras, corpos hídricos e também à saúde humana. A mandioca contém de quatro a cinco glicosídeos cianogênicos que podem liberar o ácido cianídrico (HCN) no processo de hidrólise. O ácido, também conhecido como cianeto de hidrogênio, é o principal responsável pela alta toxicidade da mandioca e pode causar intoxicações agudas, envenenamento e até morte (SPEIJERS, 1993).

Dada a constatação, os trabalhos centraram-se primeiramente em caracterizar as águas residuárias usando técnicas diversas, tais como: testes *duckweed*, sistema Microtox® para toxicidade em fase sólida e polarografia de pulso diferencial. Foi

verificado que a concentração do cianeto nas águas residuárias pode chegar a 200 mg/L (AZEVEDO E NOZAKI, 1996; BENGTTSSON E TRIET, 1994).

Em uma outra frente de trabalho, algumas pesquisas objetivaram remover o ácido cianídrico do efluente por meio do tratamento anaeróbio. Percebeu-se que o alto teor de amido, alta relação carbono/nitrogênio e a presença de cianogênicos no efluente também são tóxicos às arqueias metanogênicas e inibem a metanogênese, limitando a produção de biogás. Em duas publicações no mesmo ano, Cuzin et al. (1992) e Cuzin e Labat (1992) objetivaram remover o HCN e produzir biogás usando um reator de fluxo pistonado em regime contínuo (128 L). O melhor rendimento obtido foi de 0,661 m³ biogás/Kg.SV em uma taxa de carregamento de 3,6 kg.SV/m³.d. Os autores relataram que não houve inibição da metanogênese no reator, com concentrações de cianeto entre 5 e 6 mg/L.

Em outro estudo, Siller e Winter (1998) atingiram os melhores resultados da década ao simular a estabilização anaeróbia usando uma água residuária com 20 g.DQO/L preparada a partir de raízes de mandioca. O teste se deu em um reator metanogênico de leito fixo (2,2 L). Na fase inicial da degradação, a estabilização levou seis meses até atingir baixas concentrações de cianeto (10 mg/L). Após o estabelecimento do biofilme, a eficiência de remoção do cianeto melhorou para 99%. Na condição onde a carga aplicada era de 12 mg/L.d e TDH de três dias, a concentração de cianeto foi inferior a 0,5 mg.

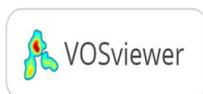
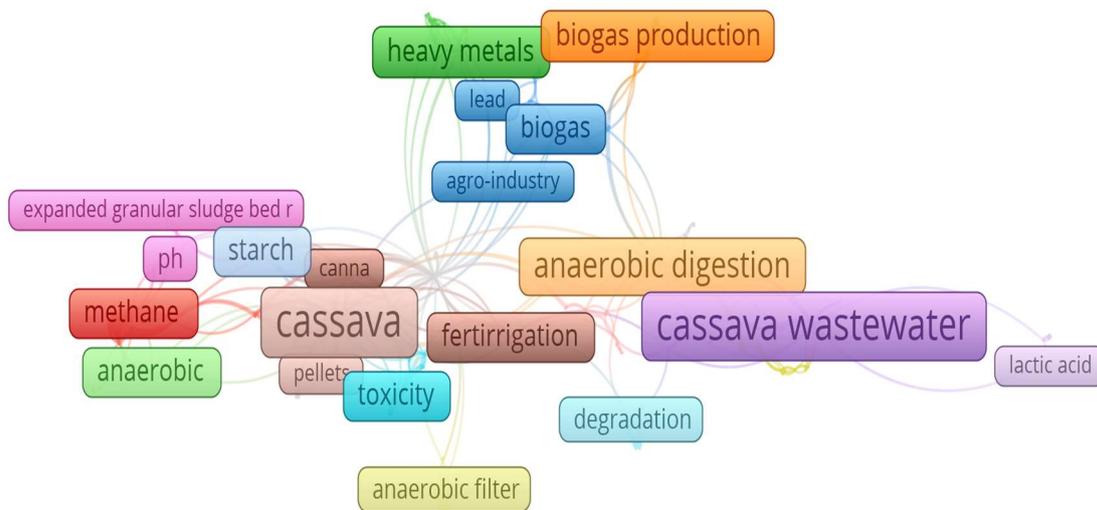
3.2.6.3 2001-2010

Neste período foram publicados 61 artigos sobre o tema e o VOSViewer indicou que 302 palavras-chave foram usadas pelos autores pelo menos uma vez, 50 duas e 21 três. O mapa com *clusters* (Figura 3.9) mostra as palavras usadas pelo menos uma vez.

Nesta década houveram avanços importantes em várias frentes de trabalho, em especial relacionados à diversificação dos reatores utilizados e ao início da caracterização da comunidade microbiana presente na biomassa anaeróbia. Após a verificação de que o cianeto de hidrogênio é tóxico às arqueias metanogênicas e consequentemente prejudica a recuperação do biogás, neste período os trabalhos estiveram focados em garantir o aumento de eficiência de remoção do ácido. Seguindo o caminho dos trabalhos da década anterior, os pesquisadores verificaram que, após o estabelecimento do biofilme nos reatores anaeróbios, o aumento do tempo de contato do efluente com a biomassa anaeróbia garante ganhos de até 99% em termos de eficiência de remoção do cianeto (COLIN *et al.*, 2007; OLIVEIRA, REIS E NOZAKI, 2001; ZAHER *et al.*, 2006). A partir

das respostas encontradas quanto à remoção do ácido, as investigações se diferenciaram ao tentarem encontrar a relação ótima entre Tempo de Detenção Hidráulica e Carga Orgânica Volumétrica aplicada para melhorar, também, a eficiência de remoção de DQO e a recuperação de recursos.

Figura 3.9 - Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 2001 e 2010.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Oliveira, Reis e Nozaki (2001) conseguiram remover 99% do cianeto e 99% da DQO ao aplicarem um pré-tratamento por coagulação usando sais de alumínio seguido de um pós-tratamento em três etapas: adesão, floculação e coagulação. Na digestão da água residuária da produção de farinha de mandioca, o conjunto usado pelos pesquisadores contava com um reator anaeróbio (20 L), seguido de um reator aeróbio (20 L) e um clarificador (4 L). O estudo cinético mostrou ainda que a taxa de remoção de DQO no sistema proposto foi a maior relatada até então.

Reatores UASB (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) em escala de bancada foram utilizados por Karthikeyan e Sabarathinam (2002) e Zheng et al. (2002) para testar os efeitos da variação de Carga Orgânica Volumétrica (COV) e do TDH. Os melhores resultados foram encontrados por Zheng et al. (2002), que alcançou 90% de remoção de DQO e produção volumétrica de biogás de 3,95 litros em uma carga orgânica de 7g.DQO/L.d em 0,7 dias.

Ainda em 2002, o trabalho proposto por Carbone et al. (2002) diferenciou-se por investigar a prevalência de grupos e espécies de microrganismos presentes em um sistema bifásico (reator acidogênico seguido de reator metanogênico) tratando águas residuárias de uma indústria de amido de mandioca. Identificou-se que as arquéias metanogênicas foram dominadas pelo gênero *Methanosaeta*. A nível de espécie, o estudo identificou sete bactérias gram-negativas anaeróbias facultativas: *Alcalifaciens* sp., *Providencia rettgeri*, *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii*, *Klebsiella oxytoca*, *Proteus penneri* e *Yersinia enterocolitica*.

As experimentações então avançaram no sentido de aumentar a eficiência de remoção de DQO ao diminuir o TDH e aumentar a COV. Chaiprasert et al. (2003) trabalhou com reatores anaeróbios híbridos (6 L) durante seis meses com o objetivo de testar COV's variando de 0,3 a 5,5 g.DQO/L.d e TDH de 3,5 a 37 dias. A experiência mostrou que a remoção de até 80% de DQO se deu no menor TDH empregado.

O reator de fluxo pistonado (2 L) foi usado pela primeira vez para tratar manípueira por Ribas e Barana (2003), que também buscaram encontrar a relação ótima entre COV e TDH. As autoras testaram duas etapas: na primeira, diminuíram o TDH gradualmente até 4 dias e na segunda mantiveram o TDH fixo em 4 dias e aumentaram gradualmente a COV. O melhor resultado (redução de 71% da DQO) se deu na segunda fase com TDH fixo e COV de 2,9 g.DQO/L.d.

Já em 2007 iniciaram-se os testes em filtros anaeróbios de fluxo horizontal (3,7 L) com variações de COV. Usando esse sistema, Colin et al. (2007) alcançaram produção volumétrica de biogás de 3,7 L.d, com 69 a 81% de CH₄. Além disso, houve remoção de 87% da DQO ao empregar a carga de 11,8 g.DQO/L.d.

Em 2007 deu-se início aos investimentos em pesquisas visando a produção de hidrogênio a partir dos efluentes do processamento de mandioca. Sangyoka, Reungsang e Moonamart (2007) testaram os efeitos das variações de pH, Nitrogênio Total, Fósforo Total, padrão de iluminação e agitação no processo acidogênico em frascos de 75 mL, utilizando águas residuárias da fabricação de amido como substrato. O rendimento máximo de H₂, de 340,19 ml.H₂/g.DQO, foi obtido nas concentrações de nitrogênio total e fósforo total de 0,2 e 0,04 M. No mesmo ano, Sangyoka, Reungsang e Moonamart (2007b) aumentaram a escala para 10 L em um reator UASB de bancada operando em dois regimes: batelada única ou batelada sequencial. Contudo, o rendimento máximo obtido (regime em batelada única) ficou abaixo do trabalho anterior (220 ml.H₂/g.DQO).

Já em 2009, foi empregada uma gama de tecnologias e houveram várias descobertas importantes para a biodegradação anaeróbia de resíduos e efluentes do beneficiamento da mandioca. A principal novidade foi a operação de um reator anaeróbio em escala plena (32.400 L) por Vidal, Lozada e Leal (2009) na Colômbia. Neste experimento, inicialmente verificou-se que o reator não apresentava boas eficiências devido à necessidade de ajuste da alcalinidade do meio reacional. As altas concentrações de compostos facilmente acidificantes no efluente exigem que o sistema anaeróbio seja tamponado para permitir uma operação estável durante a DA. Os testes mostraram que utilizar bicarbonato de sódio até a obtenção de uma relação de tamponamento entre 0,2 e 0,3 elevou a eficiência do processo, atingindo 78% de remoção de DQO em um TDH de 10,2 dias.

Já as cascas de mandioca foram utilizadas como substrato para produção de biogás em duas escalas distintas: Um reator anaeróbio (50 L) foi usado por Ofoefule e Uzodinma (2009) e um com volume de 220 L foi utilizado por Adelekan e Bamgboye (2009). A maior produção de biogás (35 L/kg.SV) se deu no reator maior ao utilizar esterco de gado como inóculo em uma proporção de 1:1 (substrato:inóculo).

Na sequência das inovações, Luo, Xie e Zhou (2009) testaram um reator ASBR (do inglês *Anaerobic Sequencing Batch Reactor*) com volume de 5 litros e avaliaram a variação de TDH e COV. O reator atingiu 80% de remoção de DQO em um TDH de 5 dias com uma carga orgânica de 11,3 kg.DQO/m³.d. Os resultados mostraram ainda a importância da manutenção do lodo em baixas concentrações nesse tipo de reator, para que a eficiência desejada na conversão anaeróbia se sustente.

A casca da mandioca também foi utilizada para produção de hidrogênio por Zong et al. (2009), que usaram um processo acidogênico combinado em duas etapas: fermentação escura (29 mL) seguida da foto-hererotrófica (60 mL). No experimento, o maior rendimento obtido foi de 611 mg.H₂/g.casca.

No fim da década, Zhang et al. (2010) propuseram um sistema para produção de etanol e metano a partir do efluente da produção de etanol de mandioca. Neste, os resíduos da destilação do etanol eram posteriormente tratados em um reator anaeróbio metanogênico. Ao usar os dois tanques (8 L cada) de fermentação conectados, o rendimento máximo de biogás foi de 290 Nm³/ton-EtOH.dia e a remoção de DQO chegou a 60% em um TDH de 5 dias em cada reator.

Depois, iniciaram-se as experiências usando os reatores do tipo CSTR (do inglês *Continuous Stirred-Tank Reactor*) por Luo et al. (2010) e Panichnumsin et al. (2010). O

em um cenário de mudanças climáticas. Esta discussão foi impulsionada pela ratificação do acordo de Paris em 2016 que, dentre outros objetivos, estimulou pesquisas que propõem aumentar a eficiência de cadeias produtivas, desenvolver tecnologias limpas e incrementar a participação de bioenergia.

Neste contexto, os trabalhos deste intervalo são marcados pela busca por integrar os resultados das pesquisas científicas com prospecções acerca dos benefícios econômicos e ambientais da recuperação de recursos. As técnicas utilizadas nas pesquisas foram expandidas e aprimoradas, sobretudo quanto à identificação e caracterização da comunidade microbiana presente na biomassa anaeróbia.

No início da década, já havia usinas produzindo biogás em escala plena na Índia. Para tornar o processo mais sustentável, Rajendran et al. (2011) propuseram conectar as plantas de biogás com plantações para que o digestato pudesse ser usado para a nutrição das culturas. Na investigação, os autores utilizaram como substrato águas residuárias de fábricas de sagu em frascos reatores de bancada. A comunidade microbiana presente na biomassa anaeróbia foi identificada por meio do método do número mais provável. A principal contribuição veio da identificação de uma mudança importante provocada pela remoção do cianeto. Verificou-se que as *Lactobacillus ssp.* se tornam mais tolerantes ao ácido em comparação com as *Proteobactérias* e o gênero *Clostridium*s, sinalizando que em condições apropriadas mais compostos orgânicos podem ser convertidos em moléculas que armazenam energia.

O aprimoramento das técnicas de biologia molecular contribuiu para progresso dos estudos acerca do tema, visto que permitiu que os pesquisadores relacionassem alterações nos parâmetros físico-químicos com as modificações na diversidade microbiana. As observações foram importantes para verificar a presença ou ausência de cepas de bactérias e arqueias que dominam o processo nas diferentes condições operacionais e têm contribuído para o entendimento do metabolismo dos microrganismos dominantes em condições otimizadas de operação.

A técnica de biologia molecular PCR (do inglês *Polymerase Chain Reaction*) seguida da Eletroforese em Gel de Gradiente Desnaturante (DGGE, do inglês *Denaturing Gradient Gel Electrophoresis*) foram as mais utilizadas pelos pesquisadores. O-Thong et al. (2011) a utilizou para analisar três culturas termofílicas mistas de fontes termais da Tailândia. O grupo usou as culturas no tratamento anaeróbio do amido de mandioca e da água residual de processamento de amido de mandioca para produção de hidrogênio em três reatores CSTR (1 L). Nos três meios utilizados, as

comunidades microbianas foram dominadas por *Thermoanaerobacterium saccharolyticum*, *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* (produtoras de hidrogênio em regime termofílico), *Anoxybacillus sp.* (capaz de produzir hidrogênio a partir de monossacarídeos), *Geobacillus sp.* (crescimento em vários tipos de amido) e *Clostridium sp.* (formador de endósporo).

Em outra pesquisa, Ren et al. (2014) usou PCR/DGGE para verificar o desempenho e dinâmica da comunidade microbiana em um sistema de co-digestão anaeróbia de duas fases usando resíduos de mandioca e esterco de porco em quatro reatores em batelada sequencial (ASBRs) (8L) seguidos de um reator CSTR (30 L). A identificação mostrou que as bactérias dos filos *Firmicutes* e *Bacteroidetes* e as arqueias das ordens *Methanobacteriales* e *Methanomicrobiales* foram vantajosas para produção de metano. O maior rendimento de biogás foi de 0,352 m³/kg.SV_{adicionado}.

Já Xie et al. (2014) buscaram utilizar a mesma metodologia para identificar a comunidade microbiana presente na biomassa anaeróbia em um sistema integrado de acidificação-desnitrificação formado por um CSTR (210 mL) seguido de um ASBR (200 mL) para o tratamento do efluente da produção de etanol a partir da mandioca. Os pesquisadores testaram o sistema com e sem a adição de nitrato de sódio (NaNO₃) em uma concentração inicial de N-NO₃⁻ de 600 mg/L. Os resultados mostraram que a adição do nitrato não afetou a metanogênese. As arqueias dominantes foram *Metanoculleus* e *Methanlobus*. Além disso, verificou-se que a presença de *Methanobrevibacter*, *Methanoplanus* e *Methanosarcina* estava diretamente relacionada com a produção de metano. A alta diversidade das comunidades microbianas na configuração proposta indicou que a adição do nitrato favoreceu a desnitrificação.

Além da PCR/DGGE, os grupos de trabalho aplicaram outras estratégias como a técnica da hibridização fluorescente *in situ* (FISH, do inglês *Fluorescent In Situ Hybridization*) e o sequenciamento. Boonapatcharoen et al. (2017) aplicaram o método FISH para estudar a diversidade microbiana presente em um reator híbrido anaeróbio (6,4 L) operado em regime contínuo. O emprego do método permitiu monitorar as populações metanogênicas e não-metanogênicas no inóculo, no leito de lodo e no leito compactado do reator e determinar a distribuição dos grupos em diferentes seções da configuração em COV's distintas. Verificou-se que o aumento da COV contribuiu para formação de ácido acético e as alterações influenciaram na mudança da dominância das *Methanosaetas* para *Methanosarcina*, uma vez que a primeira é favorecida por níveis baixos de acetato. A presença de arqueias metanogênicas foi maior no leito compacto em comparação com o

leito de lodo. O fato está relacionado com a presença maior de monômeros solúveis convertidos em ácidos graxos voláteis e ácidos no leito compactado, que permitiram uma maior disponibilidade de substrato e condições favoráveis para o crescimento das arqueias metanogênicas.

Já Han et al. (2017) usaram o sequenciamento para estudar amostras do lodo ativado em estado estacionário e de pedaços de cada material suporte utilizado em um reator anaeróbio (3,5 L) tratando efluentes de uma planta de produção de etanol de mandioca em configurações distintas: sem material suporte, com leito fixo preenchido com cerâmica porosa e com leito fixo preenchido com feltro de grafite. A amostra do reator com leito fixo preenchido com cerâmica porosa forneceu um meio mais adequado para geração e imobilização das bactérias e apresentou a maior riqueza e diversidade microbiana. Os filos dominantes em todas as amostras coletadas foram *Firmicutes*, *Bacteroidetes* e *Proteobactérias*. As classes dominantes foram Clostridia, Bacilli e Bacteroidia, responsáveis pela produção de ácidos orgânicos. O filo *Firmicutes* demonstrou ter um papel importante no reator de biofilme à base de fibra para remoção de materiais orgânicos, uma vez que são capazes de converter com eficiência materiais orgânicos complexos e acetato em hidrogênio e dióxido de carbono.

Um grande salto no estreitamento das relações entre a otimização de parâmetros físico-químicos e a cinética da diversidade microbiana foi dada por Martinez-Burgos et al. (2020) que buscaram traçar e relacionar os perfis cinéticos da produção de hidrogênio, dos compostos orgânicos e da diversidade microbiana envolvida no tratamento anaeróbio de efluentes de uma indústria de fécula. Para identificar a população microbiana presente nos dois consórcios utilizados, o grupo fez uso do protocolo da biblioteca de sequenciamento metagenômico Illumina, do gene 16S do RNAr. Os resultados identificaram quatro famílias em comum entre os dois consórcios microbianos: Enterococcaceae, Clostridiaceae, Porphyromonadacea e Ruminococcaceae.

O perfil cinético da abundância microbiana mostrou que o crescimento da família Clostridiaceae estava associado à produção de hidrogênio, uma vez que o aumento da abundância da mesma se deu entre 8h e 24h, período onde 90% do hidrogênio foi produzido. Já a Porphyromonadacea apresentou um declínio constante ao longo da produção de H₂, à medida que o pH do meio diminuiu. Logo, acredita-se que esta família possui espécies mais sensíveis às variações de pH. Quanto a Ruminococcaceae, observou-se que o crescimento se deu quando as fontes de carbono (glicose e maltose) se esgotaram, já que a família possui espécies que utilizam ácidos orgânicos como fonte de carbono.

O rendimento máximo encontrado foi de 4,12 mol de H_2 /mol de maltose utilizando o consórcio da vinhaça de mandioca hidrolisada com H_2SO_4 a 1%, pH 6, 37 °C, relação C/N 6,5 e 16% de inóculo. Nas condições ótimas, observou-se que as populações microbianas foram semelhantes em ambos os consórcios, uma vez que a condição encontrada relaciona o maior número de espécies produtoras de hidrogênio e o melhor desempenho de cada uma delas. A produção máxima se deu entre 16 e 24h de operação, onde também foi verificado o maior crescimento da biomassa anaeróbia.

Já na frente de trabalho buscando estudar o emprego de diferentes configurações de reatores para aumentar o rendimento da produção de biogás, Kuczman et al., (2013) realizaram o primeiro teste usando um reator anaeróbio (6 L) com biofiltro com bambu como material suporte para tratar águas residuárias da indústria de fécula. Na experiência, foram testados dois reatores com razões diâmetro/comprimento (D/C) distintas (1:6 e 1:3) e variações de COV (0,519-5,601 g.DQO/L.d). A principal novidade foi a estabilidade do reator durante a aplicação das maiores COV's empregadas, indicando que esta configuração é eficiente e suporta cargas maiores. As razões D/C não influenciaram na remoção de sólidos e DQO.

Doraisamy et al. (2013) verificou que os biodigestores utilizados na Índia estavam levando até 55 dias para digerir a matéria orgânica em fábricas de sagu e o processo estava sendo muito oneroso. Então, o grupo decidiu estudar três estratégias de tratamento para aumentar a eficiência do tratamento: filtro anaeróbio com leito fixo randômico; reator UASB e um reator híbrido. O último removeu 93% da DQO e 85% dos sólidos em 24h e mostrou-se a melhor opção.

O reator anaeróbio de leito fluidizado (4,2 L) foi utilizado pela primeira vez para tratar a manipueira produzida em casas de farinha do Nordeste do Brasil e obter hidrogênio por Amorim et al. (2014). No experimento, os pesquisadores utilizaram argila expandida como material suporte no reator. A produção de hidrogênio aumentou de 0,13 para 1,91 mol. H_2 /mol.glicose, conforme o TDH diminuiu de 8 para 2 horas. Os principais metabólitos solúveis encontrados foram etanol (1,87-100%), ácido acético (0,00-84,80%), ácido butírico (0,00-66,78%) e ácido propiônico (0,00-50,14%).

Outras pesquisas também buscaram recuperar metabólitos intermediários na conversão acidogênica. Amorim et al. (2018a) avaliaram o efeito de diferentes estratégias de inibição da metanogênese (acetileno ou tratamento térmico), inoculação (rúmen bovino, lodo de estação de tratamento de efluentes domésticos ou da indústria têxtil) e concentração de manipueira (10, 20 ou 40 g. O_2 /L) na produção de hidrogênio e ácidos

carboxílicos em frascos reatores em batelada (2,3 L). Os principais produtos da degradação metabólica foram o etanol, ácido acético, butírico, propiônico e capróico. A produção de 2 g/L de ácido capróico foi relatada ao utilizar 20 g.O₂/L de DQO de manipueira e o rúmen bovino tratado termicamente como inóculo.

Ainda neste ano, Intanoo et al. (2014) buscaram a otimização da produção de hidrogênio e metano a partir de águas residuárias do processamento de mandioca em um reator UASB de duas fases (acidogênica 4 L e metanogênica 24 L) em uma operação termofílica. No trabalho, foram utilizadas COV's de 30-150 kg.DQO/m³.d. Os resultados mostraram que ao utilizar a COV de 90 kg.DQO/m³.d o rendimento máximo de hidrogênio foi de 54,21 mL/g.DQO_{aplicada} e o rendimento máximo de metano foi de 164,87 mL/g.DQO_{aplicada}. A remoção de DQO no sistema acidogênico foi de 35% e no metanogênico de 72%.

Dois anos depois, o grupo buscou utilizar o mesmo sistema com UASB em duas fases no teste do tratamento do efluente do processamento de mandioca em uma operação em regime mesofílico. Neste, a COV ideal também foi de 90 kg.DQO/m³.d e o pH do reator acidogênico foi ajustado para 5,5. O rendimento máximo de hidrogênio foi de 39,83 mL/g.DQO_{aplicada} e a remoção de DQO foi de 43,8%. Quando ao reator metanogênico, o rendimento máximo de metano foi de 115,24 mL/g.DQO_{aplicada} e a remoção de DQO foi de 93%. A operação no regime mesofílico acarretou em perdas quanto à produção de biogás, mas houveram ganhos em termos de remoção de DQO.

Seguindo esta linha, Khongkliang et al. (2017) usaram um reator UASB em duas fases (200 mL) seguido de uma célula microbiana sem membrana e câmara única (400 mL) para tratar águas residuárias da produção de amido por fermentação escura em regime termofílico. A alimentação foi fixada em 1,08 kg.DQO/m³.d e o TDH foi diminuído progressivamente de 72 para 24 horas após atingir o estado estacionário. Na célula microbiana, foram testadas tensões de 0,1 a 0,8 V e a tensão ótima para o processo foi a de 0,3 V. A fermentação escura de dois estágios integrada à eletrólise microbiana teve um rendimento de 465 ml.H₂/g.DQO, oito vezes superior ao rendimento encontrado por Intanoo, Gulari e Chavadej (2014).

Na sequência das tentativas de estudar outros reatores e encontrar alternativas eficientes e mais simples, Torres et al. (2017) usaram um reator de leito fixo (3,6 L) para tratar os efluentes da indústria de amido. Esta configuração se diferencia das demais por aumentar o tempo de retenção da biomassa anaeróbia. Os pesquisadores buscaram testá-lo ao utilizar materiais suporte diferentes: sobras de polietileno de baixa densidade,

cilindros de polietileno reciclados e hastes de bambu. A produção de H_2 foi favorecida com faixas de pH diferentes (4,5 – 6,0). No reator utilizando as sobras de polietileno como material suporte o rendimento foi de 229 mL. H_2 /L.d e utilizando bambu foi de 248 mL. H_2 /L.d. Nos dois, o aumento da COV e redução do pH diminuíram o rendimento de H_2 .

O reator anaeróbio operado em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada (ASBBR, do inglês *Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor*) com agitação mecânica (6 L) foi utilizado pela primeira vez no tratamento do efluente da produção de amido testando diferentes COV (9,0 – 18,0 DQO/L.d) em um ciclo de 4h. Contudo, o rendimento máximo de H_2 apresentado pela configuração se manteve abaixo do relatado em outros trabalhos com reatores projetados em configurações diferentes (TONELLO et al., 2018).

Apesar dos esforços para diversificação, Amorim et al. (2018b) relataram que não havia trabalhos utilizando reatores UASB sem modificações. Logo, o processo de escalonamento para um reator pleno poderia ser dificultado, uma vez que os modelos presentes no mercado são padronizados. Portanto, os autores buscaram utilizar um reator UASB (3,4 L) sem modificações em regimes de trabalho que variavam TDH (8 ou 12 horas) e COV (12 ou 15,5 g.DQO/L.d). O sistema apresentou o melhor desempenho no TDH de 8h e COV de 12 g.DQO/L.d, onde alcançou a remoção de DQO de 80% e o rendimento de 0,26 L. CH_4 /g.DQO_{removida}. A configuração utilizada se mostrou uma alternativa promissora para utilização em escala plena para gerar biogás, que poderia ser usada em fornos para substituição dos fornos a lenha para torrar a mandioca nas casas de farinha e contribuir para a preservação do semiárido do Nordeste brasileiro.

Outros trabalhos concentraram-se em avaliar a emissão de gases de efeito estufa nos processos de beneficiamento da mandioca, traçar estratégias para mitigar os impactos e quantificar os benefícios econômicos e ambientais da produção mais limpa nas cadeias produtivas. Neste sentido, Tran et al. (2015) avaliaram o uso de energia, água e emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na produção de fécula de mandioca em três fábricas. O consumo de água variou de 21-62 m³/d, o uso de eletricidade médio foi de 212 MJ/t.amido e as emissões de GEE estiveram entre 93-149 kg.CO₂/t.amido. As emissões de metano das águas residuais não tratadas foram a principal contribuição. Na discussão, aponta-se que os esforços para reduzir os impactos da produção de fécula de mandioca podem se concentrar em aumentar a eficiência energética da operação de secagem, melhorar o

projeto de algumas operações da unidade com relação à eficiência hídrica e energética e promover a adoção de práticas de reciclagem de água.

Já Kamahara et al. (2012) avaliaram a emissão de GEE da produção de tapioca na Indonésia. Os resultados mostraram que 42% do carbono da mandioca foi convertido em amido de tapioca e 16% em efluente e resíduos. Além disso, 34% do carbono das águas residuárias foi convertido em metano na lagoa de tratamento. Com base nos resultados, os pesquisadores relataram a emissão de 1,4 t.CO₂/t.tapioca no processo. A emissão de metano no tratamento do efluente foi responsável por 63% das emissões totais de GEE. Logo, considerou-se que se a produção de biogás a partir das águas residuárias do processo fosse implementada, a emissão de GEE seria reduzida para 0,49 t.CO₂/t.tapioca.

Na Tailândia, 90% das fábricas de amido de mandioca substituíram o óleo combustível pelo biogás para cobrir parte das demandas energéticas. Para avaliar os benefícios ambientais da mudança, Hansupalak et al. (2016) estimaram as emissões de gases de efeito estufa e a pegada de carbono em 100 anos. Os resultados mostraram que o biogás reduz a pegada de carbono da indústria de amido de mandioca tailandesa em 0,9-1,0 milhão de toneladas de CO₂/ano.

No final da década, os estudos buscaram relacionar a eficiência de tratamento e a recuperação de produtos de valor agregado com a sustentabilidade financeira dos projetos. Neste caminho, Padi e Chimphango (2020a) estudaram a viabilidade econômica do tratamento anaeróbico da água residuária de mandioca em diferentes cenários: 1) aproveitamento térmico do biogás; 2) aproveitamento térmico para produção de energia elétrica e uso do digestato líquido como biofertilizante; 3) aproveitamento térmico para produção de energia elétrica e uso do digestato sólido como biofertilizante. Os resultados mostraram que todos os cenários são viáveis e trazem benefícios econômicos e ambientais para o setor, ao aplicar o conceito de biorrefinaria nos processos de beneficiamento da mandioca. O mais lucrativo é o caso 2, onde a conversão dos resíduos pode garantir a autossuficiência energética da linha de produção e a expansão dos lucros por meio do excedente de energia gerado.

Nesta mesma linha, Oliveira Chaves et al. (2020) estudaram a eficiência energética e econômica da produção de biogás a partir da manipueira utilizando-a como fonte de energia na alimentação de um sistema de cogeração formado por uma microturbina a gás e um sistema de recuperação de calor, para produção de energia elétrica e térmica. Os resultados mostraram que o custo de energia elétrica foi de US \$0,16/kWh e de energia térmica foi de US\$0,04/kWh, com um payback de 1,3 anos. O

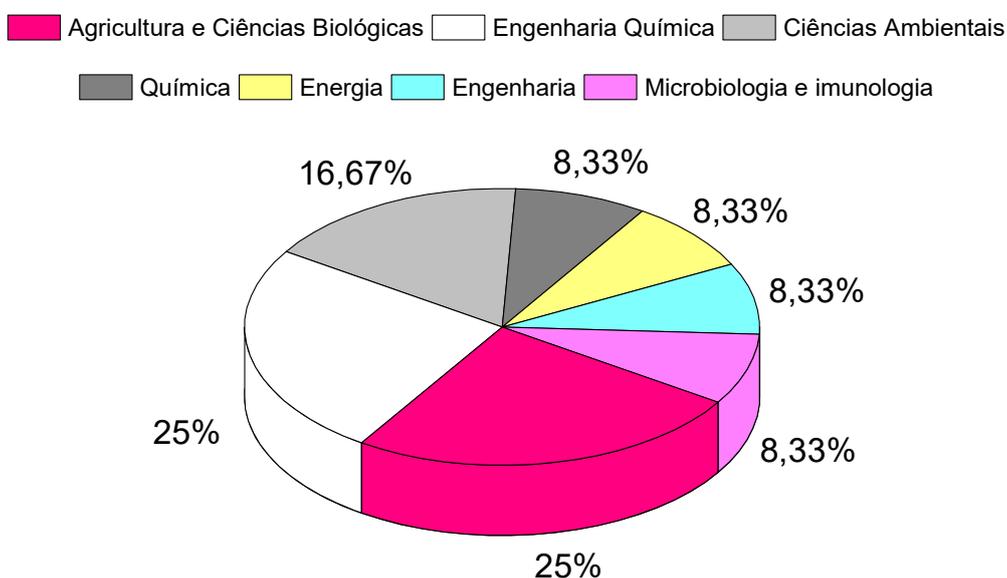
estudo mostrou que o uso do biogás a partir da manipueira é uma opção viável para as indústrias de processamento de farinha no Brasil.

3.2.7 Panorama das tendências da pesquisa sobre o tema na Universidade Federal de Alagoas

A Universidade Federal de Alagoas (UFAL) ocupa a 25^o posição no ranking das instituições que mais contribuíram para o tema. No Brasil, é a 11^a e no Nordeste a 3^a. Pelo menos um(a) pesquisador(a) da UFAL está listado(a) como um dos autores em sete trabalhos que estudaram a digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca.

Os artigos compreendem oito áreas de estudo, com predominância para Engenharia Química (25%; 3), Agricultura e Ciências Biológicas (25%; 3) e Ciências Ambientais (17%; 2) (Figura 3.11). As pesquisas envolvem a aplicação da água residuária de casas de farinha de Alagoas (manipueira) na produção agrícola e a recuperação de bioprodutos de valor agregado a partir do tratamento anaeróbio do efluente (Tabela 3.6).

Figura 3.11 - Áreas de estudo relacionadas com os artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020 produzidos por pesquisadores da Universidade.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na UFAL, o primeiro trabalho com o objetivo de tratar o efluente do processamento de mandioca foi intitulado “Desempenho do Reator Anaeróbio Horizontal com Chicanas no tratamento da manipueira em fases separadas e estabilização do pH com conchas de sururu” (SILVA, BARBOZA E CEZAR, 2009) que alcançou 95% de remoção

de DQO no sistema com 10% de manipueira. Contudo, este trabalho não se encontra no banco de dados da Scopus.

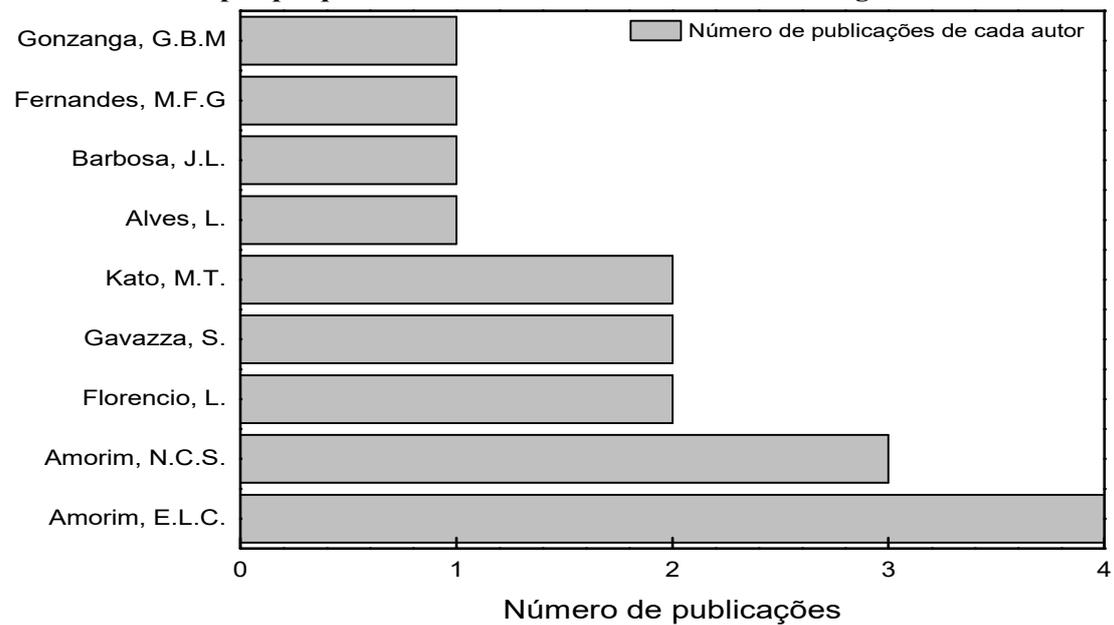
Os trabalhos presentes no banco de dados foram publicados por sete revistas e editoras diferentes (Tabela 3.6). O artigo mais citado foi o “Produção de biohidrogênio a partir de água residuária de mandioca em um reator anaeróbio de leito fluidizado” (AMORIM et al., 2014) que utilizou pela primeira vez esta configuração de reator no tratamento da manipueira e teve as principais contribuições discutidas no item anterior. O segundo foi o “Uso da manipueira como fonte de potássio na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em casa-de-vegetação” (SANTOS et al., 2010) com 12 citações que testou a aplicação de doses de 0-500 mL de água residual da indústria do processamento de mandioca no cultivo de alface e verificou que a manipueira pode ser utilizada como fonte de potássio para a cultura em doses adequadas (<300 mL).

As pesquisas estiveram focadas em duas frentes: recuperar bioprodutos de valor agregado (hidrogênio e ácidos carboxílicos) a partir do tratamento anaeróbio do efluente e estudar a aplicação da manipueira no solo no cultivo de culturas como alface, inhame e rúcula (Tabela 3.6). Apesar de seis dos sete trabalhos dos autores ligados à Universidade Federal de Alagoas terem sido publicados entre 2011 e 2020, ainda não há estudos alinhados à tendência verificada no cenário global de analisar a cadeia produtiva de processamento de mandioca na região e estudar a gestão de recursos, resíduos e efluentes, bem como os benefícios econômicos e ambientais da aplicação de tecnologias limpas na cadeia.

Os autores mais produtivos são Amorim, E.L.C. com quatro publicações (57,1%), seguido de Amorim, N.C.S. com três (42,8%) (Figura 3.12). Em relação à rede de co-autoria, o gráfico construído no VOSViewer indicou que sete autores colaboraram nos artigos que foram citados pelo menos uma vez (Figura 3.13). Na figura, a caixa representa o autor, o tamanho da caixa mostra o número de publicações e as linhas mostram os links de co-autoria. Os níveis de colaboração podem ser verificados pela espessura das linhas conectando as caixas.

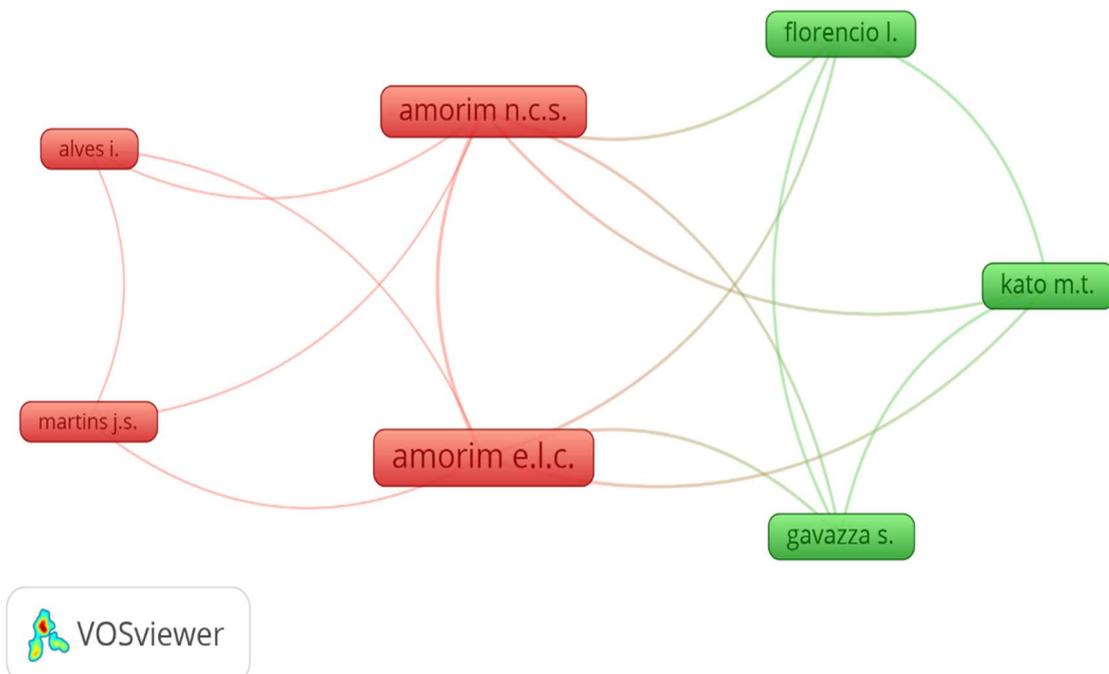
Os dois autores mais citados, Amorim, E.L.C. e Amorim, N.C.S., também foram os que mais colaboraram entre si. O gráfico revela ainda a parceria entre pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas, Amorim, E.L.C. e Amorim, N.C.S., com os da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Kato, M.T., Gavazza, S. E Florencio, L.

Figura 3.12 - Autores que publicaram artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020 produzidos por pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 3.13 - Rede de colaboração entre os pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas que assinaram os artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 3.5 - Artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir da água residuária de mandioca no período entre 1980 e 2020 produzidos por pesquisadores da Universidade Federal de Alagoas.

ANO	TÍTULO	AUTORES	CITAÇÕES	REVISTA	EDITORA
2010	Uso da manipueira como fonte de potássio na cultura da alface (<i>lactuca sativa</i> L.) cultivada em casa-de-vegetação]	dos Santos, M.H.V., de Araújo, A.C., dos Santos, D.M.R., (...), de Lima, C.L.C., Santiago, A.D.	12	<i>Acta Scientiarum - Agronomia</i>	Universidade Estadual de Maringá
2014	Produção de biohidrogênio a partir de água residuária de mandioca em um reator anaeróbico de leito fluidizado	Amorim, N.C.S., Alves, I., Martins, J.S., Amorim, E.L.C.	19	Revista Brasileira de Engenharia Química	Associação Brasileira de Engenharia Química
2017	Produção de biohidrogênio a partir de efluente de mandioca e esgoto doméstico em um reator anaeróbico de leito fluidizado	Vilela, L.M.B., Macêdo, W.V., Amorim, E.L.C.	0	<i>Latin American Applied Research</i>	<i>Plapiqui</i>
2018	O efeito da inibição da metanogênese, inóculo e concentração de substrato na produção de hidrogênio e ácidos carboxílicos a partir de águas residuárias de mandioca	Amorim, N.C.S., Amorim, E.L.C., Kato, M.T., Florencio, L., Gavazza, S.	5	<i>Biodegradation</i>	<i>Springer Netherlands</i>
2020	Tratamento de rizóforos-semente de inhame infectados por <i>Scutellonema bradys</i> e <i>Pratylenchus coffeae</i> com manipueira	Lima, R.D.S., Muniz, M.F.S., de Lima, S.S., (...), Rocha, F.D.S., Fernandes, M.F.G.	0	<i>Summa Phytopathologica</i>	Universidade Estadual Paulista
2020	Formação de ácido capróico por alongamento da cadeia de carbono durante a produção de hidrogênio fermentativo de águas residuais de mandioca	Gavazza, S., Amorim, N.C.S., Kato, M.T., Florencio, L., Amorim, E.L.C.	0	<i>Waste and Biomass Valorization</i>	<i>Springer</i>
2020	Desempenho produtivo e qualidade da rúcula (<i>Eruca sativa</i>) sob diferentes doses de água residuária de mandioca contendo fonte de potássio	da Silva, A.V.L., de Souza Medeiros, A., Gonzaga, G.B.M., (...), Barbosa, J.L., de Oliveira Pereira, M.	0	<i>Australian Journal of Crop Science</i>	<i>Southern Cross Publishing</i>

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4 CONCLUSÃO

Com base em 632 publicações recuperadas do banco de dados Scopus, este estudo forneceu uma visão geral sobre o aprofundamento do conhecimento acerca da digestão anaeróbia da água residuária do processamento de mandioca e das tendências mundiais da pesquisa sobre o tema. De acordo com o levantamento bibliométrico, foi possível concluir que:

- O crescimento das publicações tem sido rápido nos últimos 19 anos e espera-se que continue a aumentar na próxima década;
- O aumento no número de publicações é impulsionado pelas novas técnicas e avanços tecnológicos para o estudo de processos biológicos, principalmente ao que se relaciona à detecção de compostos químicos e identificação de microrganismos;
- Além disso, novos estudos são financiados em consonância com as crescentes preocupações com a busca de soluções para diferentes problemas e questões ambientais;
- Em termos de número de publicações, os autores brasileiros e chineses se destacam. Em relação ao número de trabalhos e citações, os pesquisadores do Brasil, China e Tailândia juntos foram responsáveis por 62% dos artigos publicados. Quanto à colaboração internacional, os grupos de pesquisa da Colômbia, Austrália e Vietnã foram os que mais trabalharam em conjunto;
- O volume de publicações atribuídas às economias emergentes chamou atenção para o investimento em pesquisa que estas nações têm realizado para adequar suas cadeias produtivas às agendas globais de desenvolvimento sustentável. As pesquisas demonstram que a bioconversão do efluente mostra-se atraente e já está bem difundida em escala plena, sobretudo em países asiáticos como Índia, China, Tailândia e Vietnã;
- Além do interesse em recuperar bioprodutos a partir do tratamento anaeróbio da água residuária de mandioca, as pesquisas realizadas na última década (2011-2020) também avaliaram as cadeias produtivas de forma global e apontaram outras soluções para melhorar o uso da matéria-prima, a gestão de água, o consumo de energia elétrica e as emissões de gases de efeito estufa, entre outros. Contudo, os estudos estão focados em indústrias de grande porte.

4. CAPÍTULO 4: DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE ÁGUA, RESÍDUOS, EFLUENTES E ENERGIA E QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSAMENTO DE RAÍZES DE MANDIOCA PARA PRODUÇÃO DE FARINHA NO ESTADO DE ALAGOAS.

4.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o consumo de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) e derivados é significativo (ALENE et al., 2018). O tubérculo é um dos produtos mais populares entre os brasileiros e, em 2019, o país foi o quarto maior produtor de mandioca do mundo (FAO, 2020). No mesmo ano, a produção de 17,5 milhões de toneladas das raízes implicou no rendimento de 8,8 bilhões de reais no mercado nacional (IBGE, 2021).

Apesar da importância, o Brasil ainda está dando os primeiros passos em direção à inserção da mandioca no cenário global de bioeconomia. A cadeia de processamento da raiz tem recebido menos atenção em comparação com outras culturas, como cana-de-açúcar, milho e dendê, quanto a aplicação de tecnologias mais sustentáveis nas cadeias produtivas (FURTADO et al., 2020; POKU, BIRNER E GUPTA, 2018).

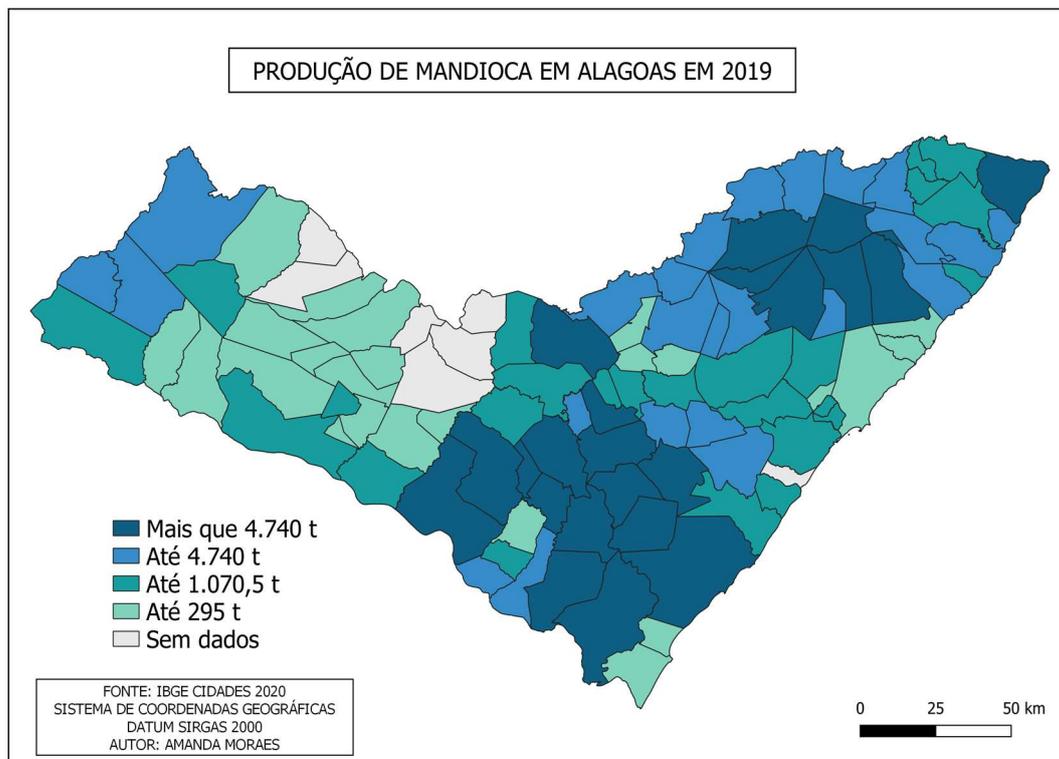
O cultivo do tubérculo está presente em todo o território brasileiro. Nas regiões Sul e Sudeste do país, a cadeia altamente tecnificada tem como principal produto a fécula. (FERREIRA et al., 2018; PONCE et al., 2020). Já nas regiões Norte e Nordeste, a exploração da cultura se dá principalmente por agricultores familiares para produção de farinha e goma em pequenas fábricas, conhecidas como casas de farinha (DANTAS et al., 2017; SÁNCHEZ et al., 2017).

Em Alagoas, a mandiocultura envolve mais de 26 mil agricultores e é uma das principais atividades agrícolas (BNB, 2019). De acordo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a produção da região Agreste do Estado (zona intermediária entre o litoral e o sertão) (Figura 4.1) foi responsável por 71,5% da produção estadual, 73,8% do valor da produção e 59% da área plantada em 2019 (IBGE, 2021).

A cadeia de produção de farinha alagoana envolve cerca de 500 casas de farinha que atendem o mercado interno e unidades de Pernambuco e Sergipe. Grande parte das unidades funcionam de maneira itinerante (apenas durante o período de colheitas das raízes) e têm capacidade para produzir uma média de 150 kg de farinha por dia (BRANDÃO, 2007). Apesar da natureza artesanal, algumas etapas da linha de produção, como a prensagem e a torração, já são mecanizadas na maioria das unidades. As melhorias

têm ajudado no desenvolvimento do setor e no crescimento da produção voltada ao mercado regional.

Figura 4.1 - Mapa da distribuição da produção de mandioca no Estado de Alagoas em 2019



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Apesar da expansão, as casas de farinha têm enfrentado desafios para se desenvolverem, sobretudo devido aos impactos ambientais do setor. Comumente, as unidades do Agreste alagoano são autuadas e fechadas por órgãos ambientais porque não estão de acordo com a legislação. As principais causas das autuações são o lançamento de efluentes sem tratamento em corpos d'água e o uso de lenha sem certificação (PACHECO, 2017).

O efluente da produção de farinha é conhecido como manipueira. O descarte sem tratamento da manipueira configura o principal problema a ser enfrentado para reduzir os impactos da operação das casas de farinha do Nordeste do Brasil (FLECK et al., 2019; MADEIRA et al., 2020). O potencial poluidor do líquido se deve ao alto teor de carboidratos solúveis que se degradam rapidamente em ácidos orgânicos, bem como pela presença de glicosídeos cianogênicos que por meio de processos enzimáticos liberam cianeto de hidrogênio (HCN), um composto tóxico e letal que está presente na manipueira em concentrações que podem chegar a 200 mg/L (AZEVEDO E NOZAKI, 1996; DUARTE et al., 2013).

Em termos de concentração de matéria orgânica, a Demanda Química de Oxigênio (DQO) do efluente de casas de farinha varia de 14 a 70 g.DQO/L (AMORIM et al., 2018; SOUZA et al., 2014). Estes valores são de duas a quatro vezes superiores aos de indústrias pequenas e médias de produção de fécula (6-15 g.DQO/L), já que não são diluídos na água residuária de outras etapas como ocorre nas fecularias (COLIN et al., 2007; DA et al., 2008).

Além dos problemas relacionados aos efluentes, a coleta de lenha sem certificação para fornecer energia térmica às casas de farinha tem aumentado a supressão da vegetação da Caatinga e as emissões de gases de efeito estufa (EMBRAPA, 2019; GIODA et al., 2019).

Dados os desafios, nota-se que é necessário estudar soluções adequadas para reduzir os impactos ambientais da produção de farinha e, assim, colaborar para o desenvolvimento do setor na região. Em países como China e Tailândia, o aperfeiçoamento da cadeia de processamento de mandioca, com vistas a melhorar a eficiência hídrica, tratar adequadamente os efluentes e reduzir as emissões de gases de efeito estufa acarretou em ganhos ambientais, econômicos e sociais nas localidades onde estão instaladas e auxiliaram no desenvolvimento da indústria no cenário global (HANSUPALAK et al., 2016; PADI E CHIMPHANGO, 2020; SÁNCHEZ et al., 2017).

Seguindo esta linha, alguns grupos de trabalho estudaram os benefícios da incorporação de melhorias à luz da produção mais limpa na linha produtiva de derivados de mandioca como amido, fécula e etanol (TRAN et al., 2015; WANG et al., 2014). Este tipo de abordagem ganhou ainda mais importância na última década, devido aos acordos globais para promover políticas de incentivo à linhas de produção mais eficientes e de baixo carbono (SHAHBAZ et al., 2016; WANG, BUI E ZHANG, 2020). Nas avaliações, o foco principal é examinar os fluxos de matéria e energia em todas as etapas do processo para identificar deficiências e estudar adequações que possam resultar em melhorias na gestão de recursos, resíduos e efluentes.

Neste sentido, Tran et al. (2015) analisou a distribuição do uso de água, energia e emissões de gases de efeito estufa em três fábricas de produção de amido de mandioca na Colômbia, Vietnã e Tailândia com o objetivo de identificar pontos críticos dos processos e propor melhorias. Os autores identificaram que práticas sustentáveis como recirculação da água residuária e produção de biogás resultam em benefícios econômicos e ambientais para as fábricas.

Pingmuanglek, Jakrawatana e Gheewala (2017) examinaram os fluxos de matéria-prima e água para identificar oportunidades de aplicação dos princípios de produção mais limpa em uma fábrica de amido de mandioca na Tailândia. A análise evidenciou quais etapas da linha produtiva apresentavam deficiências e necessitavam de mais atenção. No cenário onde as melhorias apontadas pelos autores foram incorporadas, houve redução no consumo de água (30%), fertilizantes (50%), eletricidade (8%) e na geração de efluentes (40%).

Padi e Chimphango (2020b) estudaram a viabilidade econômica de tratar a água residuária e recuperar recursos em uma fábrica de produção de amido na África do Sul. Os resultados mostraram que a conversão do efluente em produtos de valor como biogás e biofertilizante pode garantir uma linha de produção mais sustentável, além de possibilitar a expansão dos lucros da fábrica.

No entanto, ainda há poucas avaliações na literatura técnica sobre as potenciais melhorias da aplicação da produção mais limpa em fábricas de processamento de mandioca de pequeno porte. As dificuldades para realizar o diagnóstico e apontar soluções para escalas de produção menores se relacionam com a escassez de dados detalhados sobre todas as etapas do processo, além das limitações técnicas e econômicas para utilizar tecnologias já consolidadas em unidades de grande porte, como a recuperação de biogás.

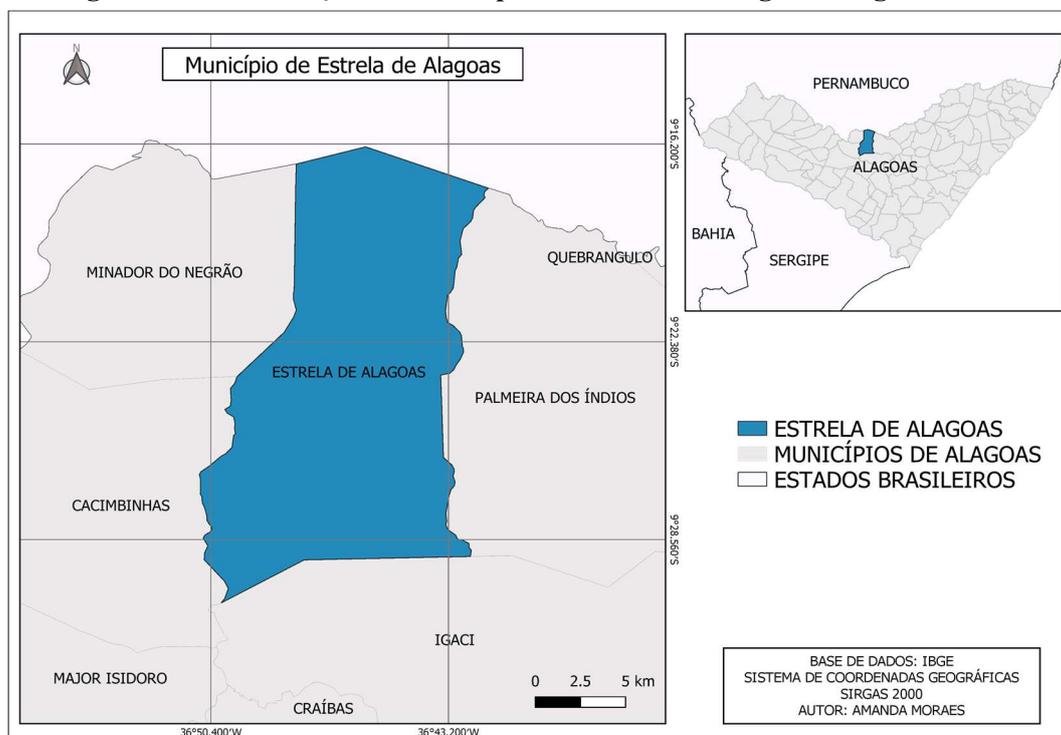
Neste contexto, este trabalho teve como objetivo realizar um diagnóstico acerca da gestão de água, resíduos, efluentes e energia e quantificar as emissões de gases de efeito estufa em uma casa de farinha de mandioca no Estado de Alagoas. A compreensão das entradas e saídas ao longo da linha de produção e o levantamento de potenciais melhorias pode auxiliar no aprofundamento de estudos sobre o tema em trabalhos futuros, bem como na implementação de políticas de suporte ao setor.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Coleta de dados

Para coletar informações acerca do processo produtivo, realizou-se uma visita a uma casa de farinha no município de Estrela de Alagoas, região do Agreste alagoano (Figura 4.2). Na ocasião, foram colhidas informações acerca das etapas do processamento das raízes e da gestão de água, resíduos, efluentes e energia elétrica. Além da observação *in loco*, foram realizadas entrevistas com administradores da unidade, trabalhadores envolvidos na produção e alguns dos agricultores que direcionam as raízes para o processamento na casa de farinha.

Figura 4.2 - Localização do município de Estrela de Alagoas, Alagoas, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2.2 Descrição da cadeia de produção da farinha na unidade de Estrela de Alagoas

O plantio da mandioca no município de Estrela de Alagoas é realizado em áreas próximas ou integradas ao terreno das residências dos produtores. Em geral, as áreas plantadas variam entre uma e duas tarefas de terra (1 ta = 3.025 m² ou 0,3 ha). O preparo para o plantio inicia-se no período chuvoso (entre maio e agosto), uma vez que a presença de umidade no solo é necessária para brotação e enraizamento (GOMES, 2018).

Durante o período de crescimento da planta, os agricultores realizam uma média de cinco manutenções na área plantada para retirar gramíneas, talos e pedras. Os produtores do município afirmam que a colheita é realizada entre 9 e 18 meses e depende de fatores como: espécie plantada, finalidade do uso e preço de mercado. Ainda segundo eles, as variedades de mandioca predominantes na região são: Campinas, Cariri, Catarina, Platina e Sergipana. Todas são de polpa branca e comumente destinadas à produção de farinha.

A colheita da mandioca é planejada com antecedência porque as raízes não podem ser armazenadas ao ar livre por mais de 48 horas, uma vez que se deterioram facilmente. As folhas e parte dos galhos que não serão utilizados para o plantio da nova lavoura são ensilados para que sejam usados como alimento animal durante o período de seca. Segundo Sobral (2014), os galhos de mandioca ensilados são uma alternativa barata para alimentação do gado, pois apresentam baixa toxicidade e boa conservação das propriedades nutricionais durante longos períodos.

As raízes colhidas em Estrela de Alagoas são processadas em uma casa de farinha no povoado Lagoa da Coroa, que processa uma média de 3 toneladas de raízes por dia em um regime de trabalho de 13 horas. Nos meses de agosto e novembro, a produção ocorre 3 vezes na semana. Já em setembro e outubro a operação ocorre quatro vezes na semana, em razão da maior oferta de mandioca na localidade.

Como forma de pagamento pelo uso da unidade de processamento, é repassado 25% do valor total da venda de farinha aos administradores da casa de farinha. A casa atende de 30 a 40 famílias de cinco povoados do município: Junça, Lagoa da Coroa, Lagoa da Pedra, Lagoa do Sirico e Pedra Vermelha.

Para transportar a matéria-prima da propriedade dos agricultores para a unidade do processamento são utilizados tratores agrícolas a diesel ou reboques em um carro leve a gasolina (Figura 4.3a). Antes de dar entrada no processamento as raízes são lavadas ou limpas a seco para retirar impurezas. Em seguida, são descascadas para garantir a eliminação de fibras, substâncias tânicas e parte do ácido cianídrico presentes na casca e na entrecasca (FERREIRA, 2013).

Durante a visita não foi possível acompanhar as etapas de lavagem e descascamento, porque as raízes processadas na ocasião foram lavadas e descascadas manualmente na casa do produtor, uma vez que a casa de farinha não possui maquinário específico para esta atividade. Alguns produtores levam as raízes ainda brutas para a unidade e as descascam com o auxílio de facas no exterior da casa de farinha, mas os

administradores relataram que esta não é uma prática comum. Após o descarregamento, as raízes são armazenadas sobre superfície não impermeabilizada antes de serem processadas (Figura 4.3b).

Figura 4.3 - Transporte das raízes (a) e descarregamento das raízes de mandioca descascadas na casa de farinha (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A matéria-prima é então triturada em um triturador industrial (Figura 4.4a) e a polpa é depositada em um tanque revestido com azulejos para evitar o acúmulo de material nas paredes (Figura 4.4b). O ralador triturador utilizado é um modelo semi-automático constituído de um cilindro metálico com lâminas nas extremidades, com motor de 2 CV e capacidade para processar 400 kg/h. O operador alimenta o equipamento colocando manualmente as raízes em contato com o cilindro em uma operação média de 10h/d. O processo permite que os grânulos de amido da raiz sejam liberados a partir do rompimento da fibra (SCHMIDT, 2006).

Após a trituração, a polpa é imediatamente prensada para evitar que a massa fermente e escureça (EMBRAPA, 2014). Esta etapa busca garantir que a umidade presente na massa seja reduzida para aumentar a eficiência das etapas posteriores, especialmente na torração que necessitará de mais energia para eliminar quantidades excessivas de umidade (EMBRAPA, 2006). A prensagem se dá em uma prensa hidráulica com motor de 3 CV, capacidade para 200 kg/h e que trabalha durante 10h/d (Figura 4.5a e Figura 4.5b).

Figura 4.4 - Trituração das raízes (a) e depósito polpa de mandioca no tanque revestido de azulejos (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 4.5 - Prensagem hidráulica da polpa de mandioca para produção de farinha na prensa hidráulica.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A massa compactada oriunda da prensagem hidráulica é armazenada temporariamente em tanques de madeira para que seja esfarelada e siga na linha de produção da farinha (Figura 4.6a). Na unidade visitada, os operadores espalham o material com o auxílio de pás de madeira para que ele se fragmente e possa ser despejado em uma peneira com a granulometria desejada no produto (Figura 4.6b). A massa é peneirada manualmente e seca em temperatura ambiente antes de ser levada à torração.

Figura 4.6 - Armazenamento da massa após a prensagem (a) e peneiramento (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A torração ocorre em fornos a lenha equipados com duas pás mecânicas que realizam a homogeneização do material (Figura 4.7a). Esta etapa visa gelatinizar parcialmente o amido e atingir umidade final de 12-13% para inibir o crescimento microbiano e garantir uma vida útil prolongada da farinha (TRAN et al., 2015). Além disso, o procedimento define as características organolépticas do produto.

A energia térmica vem da queima direta da lenha que é introduzida nos fornos por meio de aberturas na parte inferior da parede da edificação (Figura 4.7b).

Figura 4.7 - Torração da massa em fornos a lenha operados com pás mecânicas (a) e introdução de lenha embaixo dos fornos (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Segundo Sánchez et al. (2017), as casas de farinha de pequeno porte brasileiras utilizam uma média de 90 kg de lenha/dia. Em Estrela de Alagoas, a madeira usada nos fornos é colhida em terrenos próximos e a principal espécie utilizada é o Angico (*Anadenanthera macrocarpa*) que apresenta densidade de 550 kg/m³ e Poder Calorífico Inferior (PCI) de 4.006 kcal/kg.

Para a operação das pás mecânicas nos fornos, é acionado um motor elétrico de 2 CV e cada um possui capacidade para torrar 80 kg/h em uma operação de 12h/d. A fumaça e outros gases são exauridos por duas chaminés integradas ao conjunto.

Após a torração, a farinha é direcionada ao peneiramento para que os grumos formados devido à gelatinização parcial da fécula sejam retirados e a granulometria seja homogeneizada (EMBRAPA, 2005). Caso o consumidor final requeira uma farinha ainda mais fina, o material é processado em um triturador e peneirado novamente. O triturador forrageiro utilizado tem motor de 2 CV (Figura 4.8a), capacidade para processar 170-330 kg/h e opera durante 1 hora/sem.

O processamento de 3 toneladas de mandioca lavadas produz uma média de 350 kg de farinha, enquanto que as raízes limpas a seco produzem uma média de 300 kg de farinha. Para venda imediata, o ensacamento é realizado de forma manual em sacos de ráfia com capacidade para 50 kg (Figura 4.8b). A comercialização também é feita em parceria com uma cooperativa do centro do município. Neste caso, o produto é armazenado em um silo na casa de farinha, ensacado de acordo com a demanda e transportado de carro até o local.

Figura 4.8 - Trituração da farinha torrada (a) e armazenamento em sacos de ráfia (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2.3 Diagnóstico da gestão de água, efluentes, resíduos e energia elétrica na casa de farinha

A gestão da água é de responsabilidade dos produtores de mandioca, já que a lavagem úmida é realizada em suas propriedades antes do transporte para a casa de farinha. Em todas as edificações da comunidade, a água usada para abastecimento advém de duas fontes: captada da chuva ou entregue por caminhões pipa do Exército brasileiro.

A água é armazenada em reservatórios de 16 m³ concedidos aos municípios pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Paraíba (CODEVASF) por meio do programa Água para Todos do governo brasileiro (Figura 4.9).

Figura 4.9 - Cisterna com capacidade para 16 m³ utilizada para armazenamento de água dos municípios do povoado de Lagoa da Coroa – Estrela de Alagoas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto aos efluentes, a água residuária da lavagem úmida é despejada em valas abertas no terreno dos agricultores. Na casa de farinha, o efluente produzido após a prensagem hidráulica (manipueira) é despejado em uma superfície impermeabilizada e levemente inclinada que conduz o despejo à área externa por uma tubulação (Figura 4.10a), onde há uma plantação de palma (Figura 4.10b). Portanto, não há tratamento do efluente da prensagem da massa de mandioca.

A quantidade de resíduos sólidos da linha de produção varia amplamente em função de alguns fatores, tais como: modo de cultivo, espécie de mandioca, idade da planta e tecnologia utilizada no processamento das raízes (CEREDA, 2001). Os resíduos do processo são: cascas, cepas, crueira, cinzas e partículas sólidas em suspensão (Figuras 4.11a, 4.11b, 4.12a e 4.12b). Com exceção das partículas sólidas em suspensão, todos os

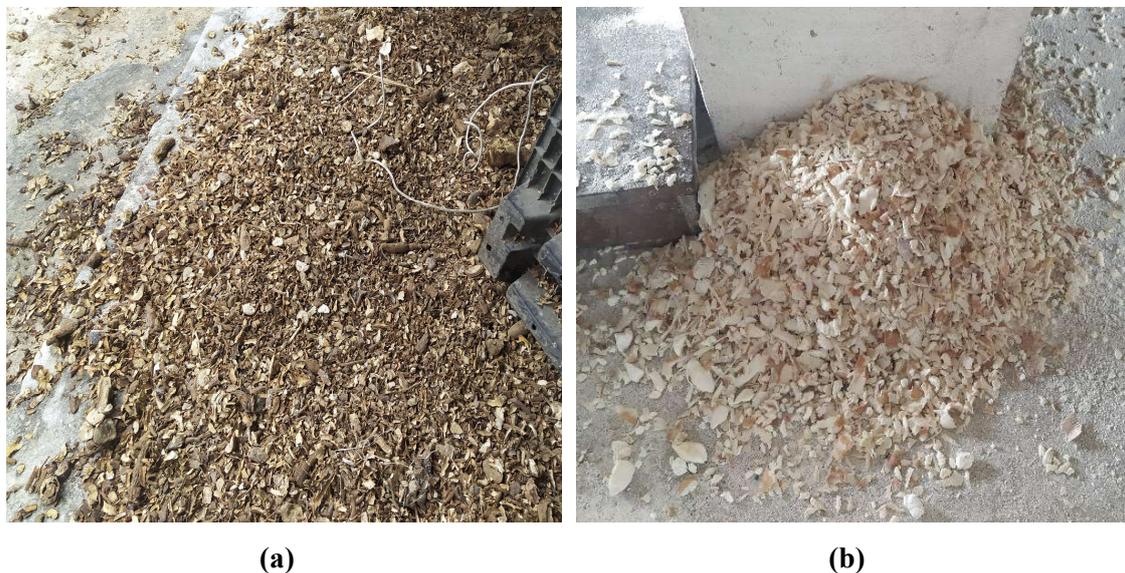
resíduos da unidade são reaproveitados em outras atividades produtivas das famílias da comunidade. As cascas, cepas e a crueira são destinadas à alimentação de ruminantes. As cinzas são utilizadas na adubação de culturas diversas.

Figura 4.10 - Manipueira despejada na superfície impermeabilizada utilizada para captação da água residuária (a) e tubulação utilizada para o despejo na área externa.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 4.11 - Cascas e cepas de mandioca após o descascamento (a) e sólidos retidos no peneiramento (crueira) (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 4.12 - Partículas sólidas em suspensão durante a torração da farinha (a) e cinzas da queima da lenha utilizada na torração (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto ao consumo de energia elétrica, a estimativa de consumo se deu a partir da coleta de informações acerca do regime de trabalho em cada uma das etapas, bem como das especificações de todos equipamentos utilizados.

4.2.4 Quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

4.2.4.1 Identificação das fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)

Para identificar as fontes de emissão de GEE no processo produtivo adotou-se a metodologia *GHG Protocol* (FGV, 2018). Os gases quantificados foram Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) e Óxido Nítrico (N_2O). O poder de aquecimento global para cada um foi de 1, 21 e 310, respectivamente (FGV, 2018). Após a quantificação das emissões dos gases foi realizada a conversão para toneladas de CO_2 equivalentes.

Para a estimativa, o *GHG Protocol* divide as informações em três escopos, a saber (SENAI, 2017):

- Escopo 1 – Emissões diretas de GEE referentes ao processo de produção, queima de combustíveis e transporte que são controlados pela organização;
- Escopo 2 – Emissões indiretas referentes a geração de energia elétrica ou térmica consumida pela empresa;
- Escopo 3 – Emissões indiretas resultantes de atividades da organização, mas que não são controladas por ela.

O Quadro 1 traz a descrição das informações colhidas na casa de farinha de Estrela de Alagoas que foram utilizadas como entrada nos escopos 1 e 2 no *GHG Protocol*.

Quadro 1 - Descrição das fontes de gases de efeito estufa identificadas.

Escopo	Categoria	Descrição
1	Combustão estacionária	Emissão decorrente da queima de lenha nos fornos para torração da farinha
	Combustão móvel	Relaciona-se com o consumo de combustível utilizado no transporte das raízes até a casa de farinha e da farinha até a cooperativa
	Efluentes	Refere-se à destinação dada para a água residuária do processamento de mandioca (manipueira)
2	Consumo de energia elétrica	Aborda o consumo de energia de todos os equipamentos utilizados ao longo da produção

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No escopo 1 as emissões de GEE advindas de fontes fugitivas foram excluídas da análise porque não havia aparelhos de ar-condicionado ou extintores de incêndio. Também não foram estimadas as emissões relacionadas às mudanças de uso no solo e atividades agrícolas, uma vez que estas etapas não puderam ser acompanhadas na visita, pois os agricultores já haviam realizado toda a colheita. Além disso, ainda no escopo 1, os resíduos não foram considerados como fontes de GEE, já que atualmente os resíduos sólidos do processo são destinados à alimentação de rebanhos de gado e, portanto, não são aplicadas quaisquer alternativas de tratamento ou destinação final presentes no protocolo (incineração, compostagem ou aterramento).

No escopo 2 foi considerada apenas a compra de energia elétrica, visto que a energia térmica advém da queima de lenha colhida nas proximidades e, desta forma, já está considerada no escopo 1.

O escopo 3 não foi utilizado na análise porque a estrutura organizacional da casa de farinha não envolve a prestação de serviços por terceiros, logo todas as emissões são de responsabilidade da rede formada pelas famílias de produtores e os administradores da casa de farinha que trabalham em conjunto.

4.2.4.2 Cálculo das emissões de gases de efeito estufa

As emissões de gases de efeito estufa foram quantificadas utilizando a ferramenta do *GHG Protocol 2020.1.2* no Microsoft Excel desenvolvida pelo Programa Brasileiro *GHG Protocol* (FGV, 2020) (Figura 4.13). O protocolo apresenta uma metodologia de quantificação consolidada na literatura e é compatível com o *Intergovernmental Panel on*

Climate Change (IPCC) (DINIZ et al., 2021; FINNEGAN et al., 2018; SANTOS et al., 2015).

Figura 4.13 - Menu geral da ferramenta de cálculo do GHG Protocol 2020.1.2 no Microsoft Excel.



Fonte: A autora (2020).

A descrição da metodologia de cálculo apresentada a seguir refere-se às categorias consideradas no Quadro 1 para o inventário.

- **Escopo 1:**

- a) **Combustão estacionária**

Neste item, considerou-se as emissões provenientes da queima direta de lenha nos fornos de torração da farinha por meio da relação entre a quantidade de lenha consumida e o fator de emissão de GEE devido ao consumo. O cálculo se deu a partir da Equação 4.1:

$$Em_{GEE} = CL * FE \quad (4.1)$$

(Equação 4.1)

Onde,

Em_{GEE} = Emissão de gases de efeito estufa (tGEE/ano)

CL = Consumo de lenha (t/ano)

FE = Fator de emissão do GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) relacionada com a quantidade de lenha utilizada para queima direta (tGEE/t) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Fatores de emissão relacionados à utilização de lenha para queima direta.

Tipo de combustível	Fator de emissão		
	CO ₂ (kg/t)	CH ₄ (kg/t)	N ₂ O (kg/t)
Lenha para queima direta	1,82	0,54	0,07

Fonte: Elaborado pela autora a partir do GHG *Protocol* (2021).

b) Combustão móvel

Neste item foi considerado o consumo de combustíveis advindo do uso de veículos para o transporte das raízes e do produto final. Para o transporte da mandioca até a unidade de beneficiamento os produtores rurais usam tratores agrícolas a diesel ou um reboque em um automóvel flex leve a gasolina. Para quantificar as emissões do consumo de diesel pelo trator agrícola foi necessária uma adaptação, uma vez que a ferramenta do *GHG Protocol* não possui informações acerca do fator de emissão deste tipo de veículo. Portanto, a média de consumo de combustível do trator foi comparada com outros veículos disponíveis na ferramenta de cálculo para verificar qual a melhor opção para a substituição. Assim, utilizou-se o caminhão leve a diesel como dado de entrada para simular o trator a diesel.

Para o cálculo, a ferramenta dispõe de três opções de entrada: tipo e ano de fabricação da frota, consumo de combustível ou distância percorrida. Neste trabalho, a quantificação das emissões para esta categoria foi realizada a partir da distância percorrida ao longo do ano. O cálculo se deu a partir da Equação 4.2:

$$Em_{GEE} = DP * FE \quad (4.2)$$

(Equação 4.2)

Onde,

Em_{GEE} = Emissão de gases de efeito estufa (tGEE/ano)

DP = Distância percorrida (km/ano)

FE = Fator de emissão do GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) relacionada com o consumo de combustíveis (tGEE/t) (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Fatores de emissão por tipo de combustível utilizado no transporte.

Tipo de combustível	Fator de emissão		
	CO ₂ (kg/l)	CH ₄ (kg/l)	N ₂ O (kg/l)
Gasolina	2,2120	0,0003	0,0002
Diesel	1,5260	0,0002	0,0002

Fonte: Elaborado pela autora a partir do *GHG Protocol* (2021).

Para o transporte da mandioca da propriedade dos produtores (9°26'17.406"N 36°45'54.025"W) para a casa de farinha (9°28'14.289"N 36°44'30.843"W) considerou-se que em todos os dias de operação são percorridos 5,2 km/dia (Figura 4.14a). Já para o transporte da farinha até a cooperativa no centro do município de Estrela de Alagoas

(9°28'14.289"N 36°44'30.843"W) considerou-se que são percorridos 12,8 km uma vez por semana (Figura 4.14b). As estimativas das distâncias percorridas foram realizadas no Google Maps a partir das informações concedidas pelos administradores e produtores rurais.

Figura 4.14 - Estimativas das distâncias percorridas utilizando o Google Maps.



Fonte: Google Maps (2020).

c) Tratamento de efluentes

O cálculo das emissões de GEE dos efluentes refere-se ao lançamento bruto da manipueira no solo. Primeiramente, considerou-se que a composição orgânica do efluente era de 27 gDQO/m³. Este valor foi obtido calculando-se a média das concentrações de DQO apresentadas nos trabalhos que utilizaram a manipueira de casas de farinha de Alagoas como objetivo de estudo (AMORIM et al., 2014; AMORIM, et al., 2018b; GAVAZZA et al., 2020; VILELA, MACÊDO E AMORIM, 2017). O valor está próximo ao apresentado no trabalho de Sánchez et al. (2017) que relatou que a DQO média do efluente de casas de farinha do Nordeste do Brasil é de 25 gDQO/m³.

Em seguida foi realizada a estimativa do fator de emissão considerando o tipo de disposição final do efluente e seu respectivo fator de conversão de metano (Tabela 4.3) utilizando a Equação 4.3:

$$FE = CMP * FCM \quad (4.3)$$

(Equação 4.3)

Onde,

FE = Fator de emissão do CH₄ relacionada com o tratamento da água residuária do processamento de mandioca (kg.CH₄/kg.DQO).

CMP = Capacidade máxima de produção de CH₄

FCM = Fator de conversão para o CH₄

Tabela 4.3 - Fator de conversão de metano referente ao tipo de tratamento aplicado.

Tipo de tratamento	Fator de conversão de metano
Vala aberta	0,1

Fonte: Elaborado pela autora a partir do GHG *Protocol* (2021).

Para a estimativa das emissões totais de CH₄ utilizou-se a Equação 4.4:

$$Em_{GEE} = TMO * FE \quad (4.4)$$

(Equação 4.4)

Onde,

Em_{GEE} = Emissão de gases de efeito estufa (tGEE/ano)

TMO = Total de matéria orgânica presente na manipueira (kgDQO/ano)

FE = Fator de emissão do CH₄ relacionada com o tratamento da água residuária do processamento de mandioca (kg.CH₄/kg.DQO).

- **Escopo 2:**

- a) **Consumo de energia elétrica**

A estimativa das emissões provenientes do consumo de energia elétrica foi realizada partir da relação entre a potência dos equipamentos utilizados e as horas trabalhadas durante o período de produção (agosto – novembro). Além disso, considerou-se o fator de emissão médio mensal do Sistema Interligado Nacional (SIN) divulgado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia para o ano de 2019 (BRASIL, 2020) (Tabela 4.4). Desta forma, o cálculo das emissões de GEE advindas do consumo de energia elétrica se deu a partir da Equação 4.5:

$$Em_{GEE} = CE * FE \quad (4.5)$$

(Equação 4.5)

Onde,

Em_{GEE} = Emissão de gases de efeito estufa (tGEE/ano)

CE = Consumo de energia elétrica (MWh/ano)

FE = Fator de emissão relacionado com o consumo de energia (tCO₂/MWh).

Tabela 4.4 - Fator de emissão médio mensal e consumo nos meses de agosto a novembro de 2019.

.Mês	Fator de emissão médio mensal (tCO ₂ /MWh)	Consumo (MWh)
Agosto	0,11	0,69
Setembro	0,10	0,92
Outubro	0,10	0,92
Novembro	0,11	0,69

Fonte: Elaborado pela autora a partir Inventário corporativo 2020 – Ministério da Ciência e Tecnologia (2020).

4.2.5 Proposta de mitigação de impactos ambientais em um cenário de produção mais limpa

O cenário de aperfeiçoamento do processo consiste na aplicação de uma série de melhorias ao longo da cadeia produtiva de farinha de mandioca. Os dados utilizados foram colhidos com fabricantes de maquinário para processamento de mandioca, no Manual de Referência para Casas de Farinha do SEBRAE/AL (2006), na literatura técnica e em entrevistas com produtores rurais e administradores da casa de farinha.

4.2.5.1 Melhorias na linha de produção na casa de farinha e no consumo de energia elétrica e térmica

Neste cenário, a lavagem e o descascamento serão realizados na casa de farinha em um lavador descascador com capacidade para 400 kg/h, motor de 3 CV e que consome de 3 litros de água por minuto. Para descascar 3.000 toneladas de mandioca por dia o equipamento irá operar durante 7,5 horas.

Nesta etapa também será considerado o uso de um tanque de sedimentação para que a água residuária da lavagem/descascamento possa ser reutilizada em novas bateladas, como relatado por Da et al. (2010), Pingmuanglek, Jakrawatana e Gheewala (2017) e Tran et al. (2015). Segundo Lamaison (2009), a água de lavagem dos lavadores descascadores carrega em suspensão as cascas e a terra removidas das raízes e possui

baixa carga orgânica, o que qualifica a reutilização após a decantação ou filtração, sem necessidade de tratamento biológico.

Como a produção na unidade ocorre geralmente em dias alternados, os sólidos sedimentáveis presentes no efluente serão decantados e poderão ser retirados antes do uso subsequente. Será considerado ainda que a recirculação de água implicará em uma economia de 43% do recurso, conforme discutido por Da et al. (2010) que estudou o ganho em eficiência hídrica ao utilizar o equipamento em uma pequena fábrica de amido no Vietnã.

Além do lavador descascador, também será adicionada uma peneira elétrica com motor de ½ CV, capacidade para processar 400 kg/h e que será operada durante 3 horas.

Na trituração e na prensagem, acredita-se que a manutenção periódica dos equipamentos aliada ao treinamento adequado dos operadores irá contribuir para que o maquinário opere próximo aos rendimentos descritos pelos fabricantes. O triturador (400 kg/h) operará durante 7,5 horas e a prensa (300 kg/h) durante 4 horas.

Quanto à torração da farinha, este cenário levará em consideração que a manutenção periódica das pás mecânicas e a recepção da massa mais seca colaborará para que os fornos (160 kg/h) tenham um regime de trabalho de 7,5 horas.

Quanto à fonte de energia térmica, os 90 kg de angico utilizados atualmente serão substituídos por 90 kg de capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum*), que apresenta densidade de 550 kg/m³ e PCI de 4.100 kca/kg. Em relação às emissões de GEE desta categoria no cenário melhorado, foi necessário fazer uma adaptação para dar entrada na ferramenta de cálculo do GHG *Protocol* 2020, uma vez que a mesma não possui informações acerca do fator de emissão do capim-elefante. Logo, após comparar os fatores, utilizou-se o fator de emissão do bagaço de cana-de-açúcar para simular o uso do capim-elefante (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Fatores de emissão relacionados à utilização de lenha para queima direta.

Tipo de combustível	Fator de emissão		
	CO ₂ (kg/t)	CH ₄ (kg/t)	N ₂ O (kg/t)
Bagaço de cana-de-açúcar	893	0,27	0,04

Fonte: Elaborado pela autora a partir do GHG *Protocol* (2021).

Quanto à gestão de resíduos e efluentes, a manipueira e a água residuária não aproveitada da etapa de lavagem e descascamento serão encaminhadas para uma fossa séptica biodigestora do modelo EMBRAPA. Os resíduos sólidos seguirão sendo

aproveitados para os fins dados no modelo de produção atual. Em relação às emissões de GEE desta categoria no novo cenário, serão utilizados os valores da Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Fator de conversão de metano referente ao tipo de tratamento aplicado.

Tipo de tratamento	Fator de conversão de metano
Fossa séptica	0,5

Fonte: Elaborado pela autora a partir do GHG *Protocol* (2021).

No transporte, será considerado que o trator agrícola será abastecido com diesel (que contém uma parcela de biodiesel), e o veículo leve flex será abastecido com etanol. A distância percorrida será a mesma do cenário base. Quanto às emissões de GEE, serão utilizados os fatores de emissão do etanol (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Fatores de emissão do combustível utilizado no transporte.

Tipo de combustível	Fator de emissão		
	CO ₂ (kg/l)	CH ₄ (kg/l)	N ₂ O (kg/l)
Etanol	1,4570	0,0002	0,0002

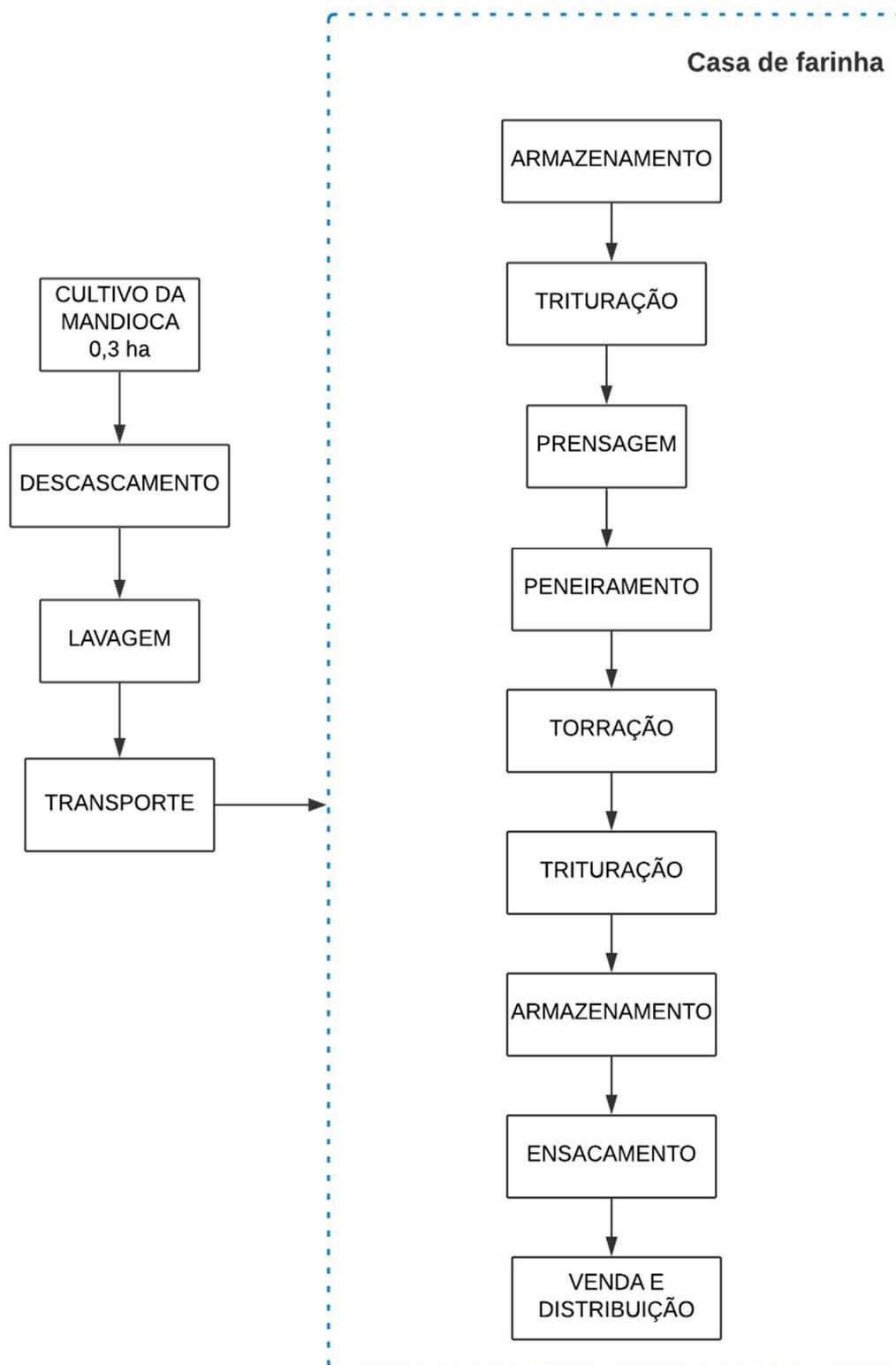
Fonte: Elaborado pela autora a partir do GHG *Protocol* (2021).

4.2.6 Balanço de massa e energia na cadeia de processamento de mandioca para produção de farinha

Para realizar o balanço de massa e energia em cada uma das etapas considerou-se a sequência completa da linha de produção, onde a mandioca é lavada e o produto final é triturado para que a granulometria dos grânulos fique ainda menor (Figura 4.15). Para isso, levou-se em consideração o uso de 3 toneladas de raízes lavadas para produzir 350 quilos de farinha, conforme informado pelos administradores da casa de farinha.

Os valores referentes aos fluxos de água e eletricidade foram estimados a partir das informações levantadas na visita, o de efluentes a partir do relatado por Araújo et al. (2014) e Sánchez et al. (2017), o de resíduos a partir de Correia (2018) e Araújo et al. (2014) e os gases de efeito estufa a partir da quantificação realizada na ferramenta de cálculo do GHG *Protocol* 2020.

Figura 4.15 - Etapas da cadeia de beneficiamento da mandioca na casa de farinha de Estrela de Alagoas, Alagoas, Brasil.



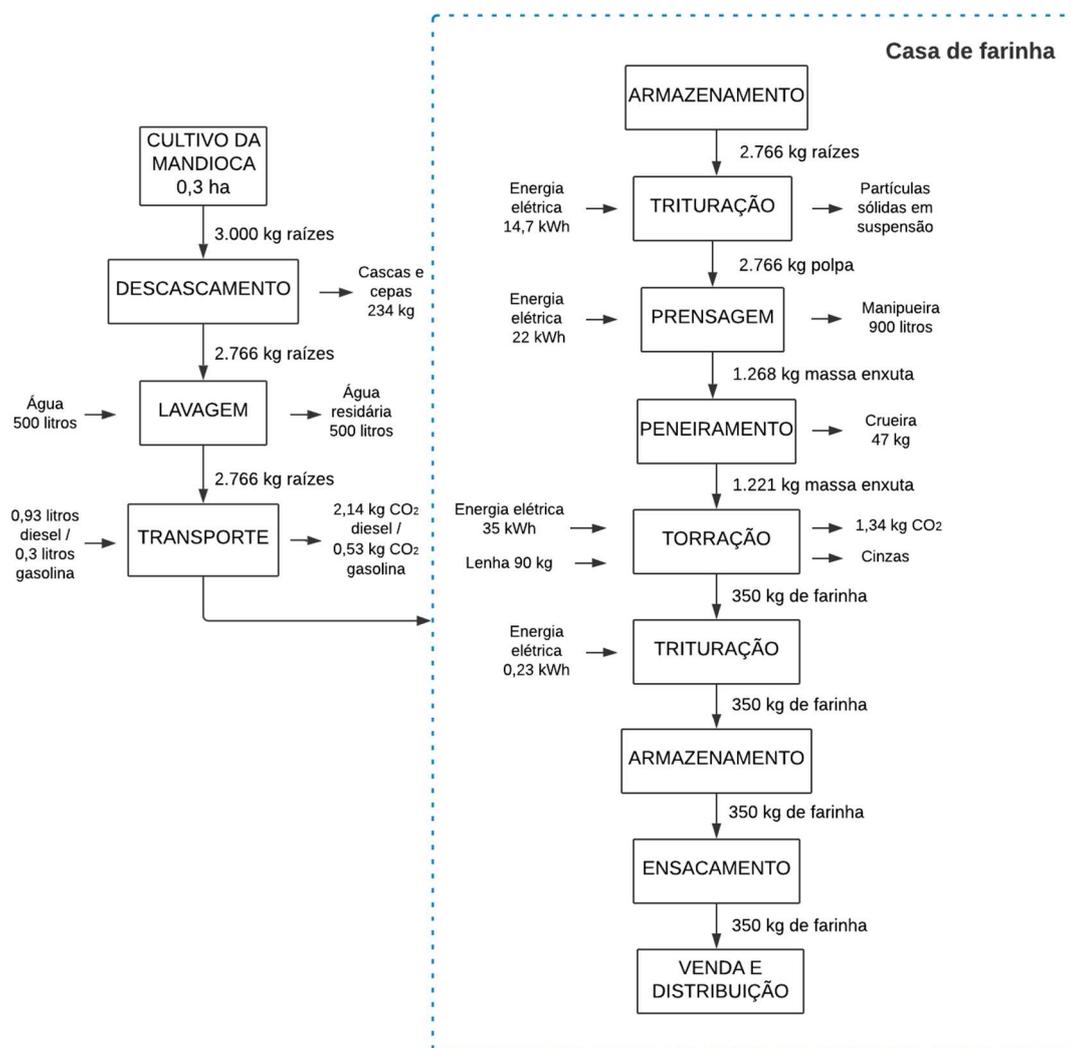
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir mostram o fluxo matéria e energia em cada uma das etapas do processamento de mandioca para produção de farinha no cenário atual (Figura 4.16). A discussão apresenta como se dá a gestão de água, resíduos, efluentes e energia, bem como as estimativas de emissões de gases de efeito estufa na linha de produção e no transporte das raízes.

Os resultados apontam ainda os principais impactos ambientais da cadeia produtiva e as potencialidades de melhorias em cada uma das etapas. A partir dos potenciais, é apresentado um cenário onde as melhorias são incorporadas no processo.

Figura 4.16 - Fluxos de matéria e energia no processamento de 3 toneladas de mandioca para produção de farinha.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.1 Gestão de água

O consumo de água está concentrado na etapa de lavagem após o descascamento. Nesta, os produtores utilizam uma média de 500 litros para lavar 3 toneladas de raízes. Contudo, os entrevistados relataram que não é possível realizar a lavagem em todas as bateladas de produção porque a região do Agreste alagoano é marcada pela escassez de água. Logo, apesar de compreenderem que o procedimento aumenta a eficiência das operações posteriores, as restrições da localidade impedem que esta etapa seja realizada por todos os produtores com periodicidade. Desta forma, o uso da água depende da tomada de decisão de cada produtor sobre utilizá-la para lavar as raízes em detrimento de outra atividade doméstica que consuma o recurso armazenado nas cisternas.

As dificuldades para utilização de água nas casas de farinha de Alagoas também foram relatadas por Brandão (2007), que buscou caracterizar a qualidade da farinha de mandioca produzida na localidade e constatou que não havia introdução de água no processo, pois o descascamento e a limpeza das raízes eram realizados a seco em razão da escassez hídrica.

Na literatura, o consumo do recurso no processamento de mandioca varia de acordo com fatores como: tecnologias utilizadas no processamento, qualidade da matéria-prima, disponibilidade do recurso, porte da unidade e produto final (TRAN et al., 2015).

Dentre estes, destaca-se a forte influência das tecnologias utilizadas nas operações unitárias ao longo da linha de produção. Pontes (2018) relatou o consumo de 1.192 litros por tonelada de mandioca processada em uma fábrica mecanizada no Brasil (capacidade 5 t/d) que utiliza um lavador descascador para retirar as cascas e limpar as raízes. Em uma fábrica média da Tailândia (4 t/d) utiliza-se 18.000 L/t em um conjunto que usa tambores com água para remoção das impurezas seguidos de um descascador mecânico (CHAVALPARIT E ONGWANDEE, 2009). Já em uma unidade artesanal do Vietnã (1 t/dia) que introduz as raízes lavadas manualmente em uma raspadeira mecânica o consumo é de 31.900 litros (DA et al., 2008).

O uso adequado do recurso nestas etapas é um fator chave para a operação, uma vez que a utilização de uma quantidade menor de água pode impactar negativamente no rendimento do produto final (TRAN et al., 2015). O descascamento seguido de lavagem úmida facilita a recuperação de amido e aumenta o rendimento geral do processo (DA et al., 2010). Segundo os administradores da unidade visitada, o rendimento a partir de raízes

limpas a seco é de 100 kg/t de mandioca processada, enquanto que o de raízes submetidas a lavagem úmida é de 120 kg/t.

4.3.2 Gestão de resíduos e efluentes

Na prensagem de uma tonelada de mandioca são produzidos cerca de 300 litros de manipueira (ARAÚJO et al., 2014; SÁNCHEZ et al., 2017; SOUZA et al., 2014). Na unidade de Estrela de Alagoas, todo o efluente gerado é descartado diretamente no solo na área externa da unidade.

O descarte sem tratamento da manipueira acarreta em danos ambientais e configura o principal problema a ser enfrentado para reduzir os impactos da operação das casas de farinha brasileiras (FLECK et al., 2019; MADEIRA et al., 2020). De acordo com Souza et al. (2014), em grande parte das cerca de 500 casas de farinha de Alagoas, o descarte da manipueira é realizado sem controle, especialmente em córregos de pequeno ou médio porte nas imediações das unidades de processamento.

O despejo no solo ou diretamente em corpos d'água leva à uma série de consequências danosas. No solo, a aplicação pode alterar o pH, aumentar a salinidade e causar um desequilíbrio de nutrientes (BARRETO et al., 2013). Nos corpos hídricos, o líquido de aparência leitosa bloqueia a entrada de luz solar, impede a fotossíntese e reduz a disponibilidade de oxigênio no meio, além de causar a morte da fauna aquática devido ao excesso de ácido cianídrico no ambiente (ANGONESE et al., 2006). As condições hidrológicas do Agreste alagoano (presença de rios intermitentes) agravam as consequências danosas do despejo inadequado (SÁNCHEZ et al., 2017).

Quanto aos outros subprodutos, as cascas geradas a partir do descascamento da raiz são o principal resíduo sólido. De acordo com Araújo (2014), são produzidas 77,9 kg de cascas com cepas por toneladas de mandioca processada. Em segundo, tem-se os 15,9 kg/t de crueira produzidos a partir da retenção de sólidos no peneiramento.

Estes subprodutos são integralmente aproveitados para a alimentação de bovinos, gado leiteiro e de corte. Para utilizar os resíduos, os produtores rurais deixam o material exposto ao sol por dias para que o ácido cianídrico presente na casca e entrecasca seja eliminado e não cause problemas para o trato digestivo dos animais. Ferreira (2011) e Dourado (2017) destacam que o uso de resíduos do processamento de mandioca como alimentação animal é uma prática comum em áreas próximas às casas de farinha ou feculares, em razão do alto valor energético dos constituintes da raiz de mandioca.

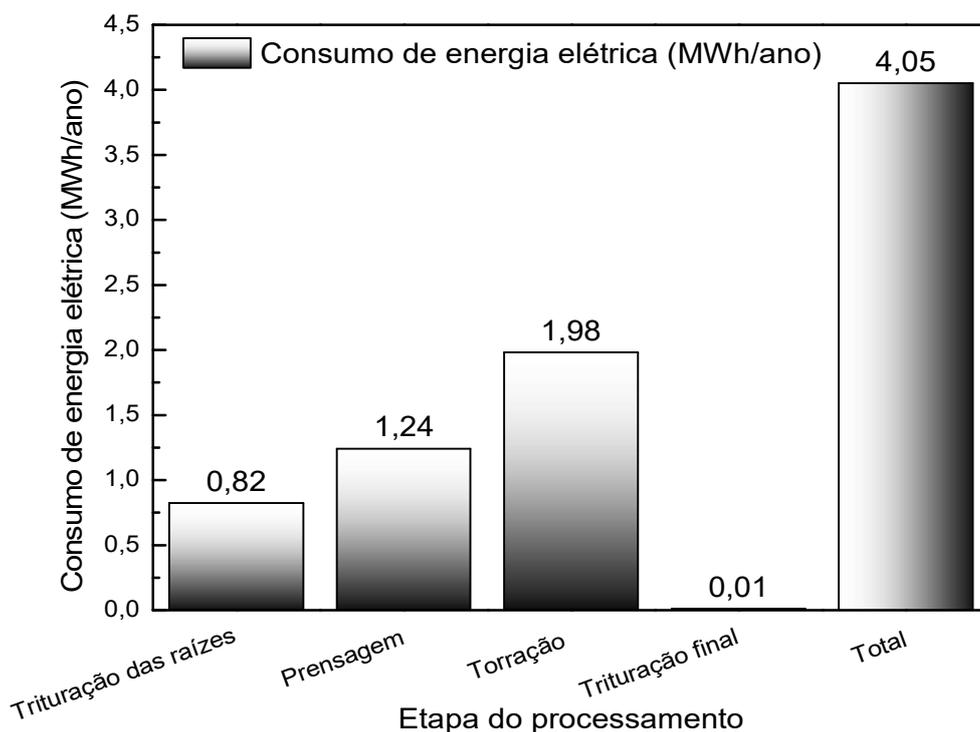
Em outras etapas da linha de produção, como a trituração, a torração e a classificação, há a presença de partículas sólidas em suspensão. Entretanto, não foram encontrados dados na literatura sobre a quantidade produzida. Na unidade, as partículas mais leves ficam em suspensão no ar e acabam inaladas pelos operadores junto com outros materiais particulados, já que não são utilizados equipamentos de proteção individual, como indicado pelo Manual de Boas Práticas em Casas de Farinha elaborado pelo SEBRAE/AL (2006). Os resíduos que se depositam na superfície são varridos para a área externa ao final da operação e descartados em lixeiras comuns.

Além destes, a queima de lenha nos fornos para torração de farinha também produz cinzas. Este resíduo também não foi quantificado na literatura e, na unidade, é recolhido para ser utilizado pelos produtores rurais da comunidade em lavouras de culturas diversas. A aplicação na agricultura pode ajudar no controle do pH do solo, aumentar a capacidade de retenção de água e fornecer nutrientes (DE ARRUDA et al., 2016; PANDEY, 2020). Entretanto, a utilização deve ser realizada com orientação técnica, mas na comunidade não há acompanhamento para a aplicação no solo.

4.3.3 Gestão de energia elétrica e térmica

O consumo total de eletricidade para processar 168 toneladas de mandioca ao longo dos quatro meses de operação em 2019 foi de 4,05 MWh. A atividade que mais consome energia elétrica é a torração (1,98 Wh; 48,8%), em razão da utilização conjunta de dois fornos com pás mecânicas semiautomáticas por uma média de 12 horas por dia. Em segundo, a etapa de prensagem requer 1,24 Wh (30,5%) do consumo do processo ao utilizar uma prensa hidráulica em um regime de trabalho de 10 h/d. A trituração das raízes requer 0,82 Wh (20,3%) da eletricidade consumida a partir do uso do triturador por 10h/d. Já a trituração da farinha torrada demanda somente 0,01 Wh (0,3%) do consumo anual, uma vez que a utilização do triturador forrageiro durante uma hora por semana está condicionada à pedidos específicos para que a farinha seja triturada e vendida em uma granulometria menor que a usual. A Figura 4.17 traz o consumo de energia elétrica por etapa do processo.

Figura 4.17 - Porcentagem do consumo anual de energia elétrica por etapa do processo no cenário base.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diferentemente do encontrado na unidade estudada, a literatura relata que o consumo de energia elétrica no processamento de mandioca para produção de amido e fécula em unidades de pequeno porte é liderado pela trituração das raízes (COLIN et al., 2007; DA et al., 2008; TRAN et al., 2015). Contudo, na produção destes produtos os fornos são utilizados somente para secar e não torrar, como nas casas de farinha.

Concomitantemente, a literatura técnica aponta que a etapa conjunta de descascamento/lavagem é a segunda maior consumidora de eletricidade em fábricas de processamento de mandioca de pequeno porte, em razão da utilização de lavadores descascadores semiautomáticos. Porém, a unidade de Estrela de Alagoas não conta com o equipamento.

O alto consumo de eletricidade na etapa de torração também pode estar relacionado com deficiências nas etapas anteriores, que podem não estar sendo suficientemente eficientes em garantir que o excesso de umidade da massa seja removido e facilite a torração da farinha nos fornos. Além disso, os administradores relataram que a intensidade do aquecimento dos fornos depende da qualidade da lenha colhida. Logo, em circunstâncias onde a qualidade da lenha utilizada é baixa, a operação é demorada e

requer um consumo maior de energia para movimentar as pás mecânicas que homogeneizam a farinha por mais tempo.

Segundo a EMBRAPA (2019), a queima direta de lenha é comumente utilizada para produzir energia térmica para aquecer a massa e torrar a farinha e configura-se como a principal fonte energética na linha de produção da farinha de mandioca no Brasil. Considerando a utilização do Angico (*Anadenanthera macrocarpa*) como espécie colhida para uso nos fornos, tem-se que a queima de lenha da caatinga fornece 1.505 MJ de energia térmica por dia para a planta (DE OLIVEIRA, 2018). O valor está dentro do intervalo relatado por Sriroth et al. (2000) e Ahou et al. (2019) para o fornecimento de energia térmica advindo do uso de lenha (1.141-2.749 MJ). Contudo, apesar de ser a principal espécie utilizada, esta não é a única madeira usada nos fornos. Logo, há variações no fornecimento de energia térmica.

4.3.4 Emissões de gases de efeito estufa

O total de emissões de GEE da unidade de processamento de mandioca para produção de farinha em Estrela de Alagoas no ano 2019 foi de 1.376 kgCO₂e. As emissões diretas da unidade foram de 1.073 kgCO₂e (78%) e as indiretas foram de 303 kgCO₂e (22%).

Em relação às categorias das emissões diretas, tem-se que os efluentes foram os principais responsáveis pelas emissões totais de GEE (850 kgCO₂e), seguidos da combustão móvel (148 kgCO₂e) (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Emissões totais de GEE por categoria de emissões diretas e indiretas.

Escopo	Categoria	Emissão (kgCO ₂ e)	Emissões totais (kgCO ₂ e)
Escopo 1	Combustão estacionária	75	1.073
	Combustão móvel	148	
	Efluentes	850	
Escopo 2	Energia elétrica	303	303
Total			1.376

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A emissão de 850 kgCO₂e dos efluentes advém do despejo de 16,8 m³ de manipueira em vala aberta e sem tratamento. Os resultados encontrados estão de acordo com os relatados por Tran et al. (2015) que também avaliaram as emissões de GEE em fábricas de processamento de mandioca de pequeno, médio e grande porte e verificaram que os efluentes são responsáveis pela maior parcela de emissão de gases de efeito estufa em cenários onde não há captura do biogás.

Com relação à combustão móvel, a emissão dos 148 kgCO_{2e} foram referentes ao consumo de 51,96 litros de diesel e 16,72 litros de gasolina comum (Tabela 4.9). O uso de diesel pelo trator agrícola foi responsável por 120 kgCO_{2e} e a utilização da gasolina no veículo leve por 28 kgCO_{2e}.

Tabela 4.9 - Consumo anual e emissões de GEE por tipo de combustível consumido na frota utilizada.

Tipo de combustível	Consumo anual (L)	Emissões			Emissões totais (kgCO _{2e})
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Diesel	51,96	120	0,0	0,0	120
Gasolina	16,72	28	0,0	0,0	28
Total	68,68				148

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nos trabalhos realizados por Santos et al. (2015) e Da Silva (2020) o uso de combustíveis líquidos também foi responsável pela segunda maior contribuição para o total de emissões diretas, atrás do tratamento de efluentes. O uso de combustíveis no setor de transportes contribui significativamente para as emissões de CO_{2e} e são um ponto chave para o cumprimento das metas globais de redução de gases de efeito estufa (ALBUQUERQUE et al., 2020; KIANI, 2017; TREVISAN E BORDIGNON, 2020).

Já a emissão de 75 kgCO_{2e} na combustão estacionária refere-se à queima direta de 5 toneladas de lenha para o fornecimento de energia térmica para a torração da farinha nos fornos. Além da emissão na linha de produção, o consumo intensivo de lenha afeta consideravelmente os recursos florestais e contribui para o aquecimento global (FAO, 2010; AHMAD ROMADHONI SURYA PUTRA, LIU E LUND, 2017). Considerando a média de 52,6 m³ de lenha por hectare na Caatinga, infere-se que a cadeia produtiva da mandioca contribui para o desmatamento anual estimado de 29.556 hectares no bioma brasileiro (ALVAREZ et al., 2009; EMBRAPA, 2017).

A liberação de GEE pelo desmatamento é significativo (FEARNSIDE, 2002). No Nordeste do Brasil, Coelho (2018) verificou que a queima direta de 1 m³ de lenha do extrativismo vegetal foi responsável pela emissão de 16,1 kgCO_{2e} e mostrou-se mais poluente que a lenha da silvicultura (10 kgCO_{2e}).

Além da liberação de gás carbônico (CO₂), a queima de biomassa também libera gases-traço como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e óxido nitroso (N₂O) que apresentam alto poder poluidor (FEARNSIDE, 2002). Apesar dos efeitos danosos, o consumo de lenha em áreas rurais e periurbanas brasileiras é alto (QUESADA, BEBER

E MOURA, 2019). Segundo Coelho et al. (2018), há uma relação estreita entre a utilização do material e regiões com índices de desenvolvimento baixos. A coleta manual em áreas circunvizinhas e a ausência de ônus para o usuário contribui para que a lenha seja a principal fonte de energia térmica de empreendimentos pequenos em áreas de baixa renda, como casas de farinha, padarias e olarias (MORAES, MARTINS E TRIGOSO, 2008; GIODA et al., 2019).

As emissões relacionadas ao desmatamento da vegetação e à mudança do solo para coleta de lenha para alimentar os fornos da unidade estudada também podem ser contabilizadas no *GHG Protocol*, mas, nesta pesquisa, não havia dados suficientes para realizar a quantificação das emissões desta categoria. No escopo 2, o consumo de 4,05 MWh ao longo dos quatro meses de operação foram responsáveis pela emissão de 303 kgCO₂e (Tabela 4.10). Desta forma, a utilização de energia elétrica é o segundo segmento que mais contribuiu para as emissões totais de gases de efeito estufa na casa de farinha.

Tabela 4.10 - Emissões atribuídas ao consumo de eletricidade na casa de farinha de Estrela de Alagoas.

Ano	Fator de emissão (kgCO ₂ /Mwh)	Consumo (MW/ano)	Emissões (kgCO ₂ e)
2019	74	4,05	303

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nos trabalhos realizados por COLIN et al. (2007) e DA et al. (2008), também observou-se que a eletricidade foi a segunda colocada na contribuição total para a emissão de GEE em fábricas de fécula. Por outro lado, TRAN et al., 2015 verificaram que o uso de energia elétrica foi o principal responsável pelas emissões totais na produção de amido.

As discrepâncias se dão porque a emissão de GEE pelo consumo de eletricidade varia de acordo com o tamanho da indústria e a contribuição de fontes renováveis na matriz energética de cada país. Em trabalhos realizados em países onde há prevalência de usinas termoelétricas que utilizam combustíveis fósseis na matriz energética, como China e Tailândia, o uso de energia tem um peso maior sobre as emissões totais. Já em países onde hidroelétricas e outras fontes renováveis contribuem significativamente para a infraestrutura energética, como Brasil e Colômbia, a influência do uso de eletricidade sobre as emissões de GEE é menor (COLIN et al., 2007; DA et al., 2008, 2010; TRAN et al., 2015).

Quanto às emissões de CO₂ biogênicas, tem-se que a queima de biomassa para fornecer energia térmica aos fornos (combustão estacionária) foi responsável por 99,9%

do total e o uso de diesel com um percentual de biodiesel (combustão móvel) foi responsável por 0,01% (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 - Emissões de CO₂ biogênicas por categoria.

Escopo	Categoria	Emissões tCO ₂ biogênicas
Escopo 1	Combustão estacionária	9.086
	Combustão móvel	0,02
Total		9.106

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A quantificação desta categoria de emissões ocorre de forma separada, já que é oriunda de processos que removeram carbono da atmosfera e estocaram na matéria biológica (LI et al., 2020; LUN et al., 2020). Assim, considera-se que as emissões biogênicas não causam impactos negativos à atmosfera, em razão do balanço nulo de CO₂.

4.3.5 Oportunidades para produção mais limpa

A cadeia de processamento da mandioca é potencialmente sustentável e pode contribuir ativamente na mudança em direção à economia circular (SALLA et al., 2010; ZHANG et al., 2016). Ao longo das últimas duas décadas, pesquisas têm mostrado que abordagens focadas não só em soluções de fim de tubo são atraentes e viáveis economicamente. Melhorias na gestão do processo, modificações na linha de produção, na matéria prima e nos produtos demonstram resultados satisfatórios e trazem benefícios econômicos e ambientais (HANSUPALAK et al., 2016; SÁNCHEZ et al., 2017).

A produção mais limpa aplicada à linha de produção de farinha de mandioca pode melhorar o gerenciamento de água, diminuir o consumo de energia e tratar os efluentes adequadamente. Soluções centradas em tecnologias limpas estão sendo utilizadas na cadeia da mandioca em todo o mundo, mas ainda são pouco observadas em escala pequena no Brasil. Na Tailândia, por exemplo, o Ministério de Ciência e Tecnologia indica há mais de uma década a incorporação de tecnologias limpas (reciclagem de água, recuperação do biogás produzido a partir do efluente, uso do biogás como fonte de energia térmica nos fornos, verificação de reparos, bom controle operacional) para fortalecer a cadeia de beneficiamento da mandioca e torná-la mais competitiva (JAKRAWATANA, PINGMUANGLEKA E GHEEWALA, 2017).

Na casa de farinha do Agreste alagoano, a implementação de melhorias na gestão da produção representa uma oportunidade para que o produto da comunidade se destaque dos demais. De acordo com SEBRAE (2016), a adoção de boas práticas potencializa parcerias, agrega maior valor ao produto comercializado e reduz os custos com recursos.

Atualmente, a comunidade tenta já certificar outros produtos produzidos na região (ex.: frutas em caldas e compotas). Assim, a certificação da farinha pode fornecer uma alternativa para aumentar os ganhos econômicos das famílias da localidade.

A seguir são apresentadas algumas soluções pensadas à luz dos conceitos de ecologia industrial e adequadas ao contexto da linha de produção de uma pequena fábrica de processamento de mandioca para produção de farinha no Agreste alagoano.

a) Melhorias na linha de produção

O uso de um lavador descascador semiautomático na unidade colaboraria para o aumento da eficiência de extração de amido, elevando também o rendimento final do produto (PINGMUANGLEK, JAKRAWATANA E GHEEWALA, 2017). Considerando a escassez do recurso hídrico na localidade, é necessário que o equipamento consuma o menor volume de água possível. No mercado atual, uma máquina de maior porte (>800 kg/h) usa de 5 a 10 litros por minuto para o processamento, enquanto que máquinas menores (400 kg/h) usam uma média de 3 litros/min. A utilização de uma máquina menos robusta pode atender as necessidades atuais da casa de farinha, uma vez que a unidade processa 3 toneladas por dia.

Além da atenção voltada para o consumo de água do equipamento a ser adquirido, indica-se que o uso do mesmo seja feito em conjunto com a adoção de práticas de recirculação de água. O reúso de água residuária das etapas de lavagem e descascamento tem contribuído para promover a economia do recurso e aumentar a eficiência hídrica em unidades em escalas distintas (HANSUPALAK et al., 2016; PINGMUANGLEK, JAKRAWATANA E GHEEWALA, 2017; TRAN et al., 2015a). Em uma fábrica pequena, indica-se o acoplamento de tanques de sedimentação no lavador descascador para que os sólidos presentes na água residuária sejam removidos após a decantação e seja possível bombeá-la de volta para reutilização em novas bateladas de descascamento e lavagem da mandioca (DA et al., 2010).

Tran et al. (2015) observaram que em indústrias de maior porte esta é uma prática comum e sugerem que também seja incorporada por fábricas de médio e pequeno porte para aumentar a eficiência hídrica das cadeias produtivas.

Pingmuanglek, Jakrawatana e Gheewala (2017) analisaram potencialidades da incorporação de uma série de melhorias em uma fábrica de amido de mandioca de médio porte na Tailândia. No estudo, 30% do recurso foi economizado em razão das práticas de recirculação de água para etapa de lavagem e descascamento das raízes.

Já Da et al. (2010) simularam a utilização de dois descascadores de mandioca com *design* e configuração distintas com o objetivo de selecionar a melhor estratégia para garantir uma tecnologia de uso eficiente de água em uma pequena fábrica de amido de mandioca no Vietnã. As configurações foram: i) uma câmara de descascamento-agitação-filtragem e ii) uma câmara de agitação com filtragem vertical que recebia as raízes já lavadas em outro equipamento. Ambos os tanques de sedimentação recebiam a água residuária dos processos. Verificou-se que a eficiência de reciclagem de água do primeiro foi superior ao conjunto que recebia as raízes já lavadas em outro equipamento. O reúso da água residuária permitiu a economia de 43% do recurso hídrico e a recuperação de amido nas etapas posteriores manteve-se similar ao cenário sem reciclagem, sem perda na qualidade do produto.

Em outros trabalhos com foco na produção mais limpa, os lavadores descascadores foram incorporados desde o caso base estudado, evidenciando que os benefícios do uso deste equipamento na linha de beneficiamento da mandioca para produção de amido e farinha já é um consenso na literatura técnica (HANSUPALAK et al., 2016; JAKRAWATANA, PINGMUANGLEKA E GHEEWALA, 2016; PADI E CHIMPHANGO, 2020b; PINGMUANGLEK, JAKRAWATANA E GHEEWALA, 2017; SÁNCHEZ et al., 2017; TRAN et al., 2015).

b) Melhorias no consumo de energia elétrica e térmica

Além da gestão da água, verificou-se que a operação dos fornos está demandando energia em excesso. O problema pode estar relacionado com a baixa efetividade das etapas de trituração das raízes e prensagem da massa (EMBRAPA 2006; PINGMUANGLEK, JAKRAWATANA E GHEEWALA, 2017).

Pingmuanglek, Jakrawatana e Gheewala (2017) indica que seja utilizado um triturador que garanta que as partículas trituradas sejam mais finas e, conseqüentemente, a prensagem seja facilitada. Contudo, na cadeia estudada esta indicação esbarra em questões culturais dos consumidores do Agreste alagoano. Nesta região, consome-se uma farinha de granulometria mais grossa em comparação com a vendida em outros estados da região Nordeste do Brasil, como Sergipe e Bahia. Portanto, as melhorias propostas nesta seção buscarão garantir que os equipamentos operem conforme o desempenho descrito pelos fabricantes, uma vez que o balanço de massa e energia mostrou que o rendimento atual está abaixo do esperado. Para alcançar este objetivo, a estratégia será estabelecer uma programação de acompanhamento e manutenção do maquinário. Em

conjunto com a programação, sugere-se que os trabalhadores envolvidos na linha produtiva sejam treinados para garantir o pleno funcionamento da maquinaria, conforme recomendado pelo SEBRAE/AL (2006) e por Jakrawatana, Pingmuangleka e Gheewala (2016).

O Manual de Referência para Casas de Farinha do SEBRAE/AL (2006) também aponta que o uso de peneiras vibratórias elétricas na etapa de peneiramento colabora para aumentar a qualidade do produto final.

Quanto à fonte de energia térmica, o uso da madeira de espécies da localidade tem contribuído para aumentar a supressão vegetal na Caatinga. A substituição da lenha oriunda do extrativismo vegetal por alternativas mais sustentáveis pode contribuir para preservar o bioma e reduzir as emissões de GEE causadas pelo desmatamento da vegetação.

Trabalhos recentes têm apontado o capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum*) como fonte bioenergética promissora em fornos e caldeiras, em razão da alta produção de biomassa (45 toneladas de massa seca por hectare em um ano), boa adaptação a condições de estresse hídrico e alto poder calorífico (EMBRAPA, 2015; MACHADO et al., 2019; SILVEIRA, 2018; VIEIRA et al., 2017). Além de figurar como uma opção mais sustentável, o capim-elefante possui um PCI (4.100 kcal/kg) superior ao do Angico (4.006 kcal/kg) e pode garantir que haja menos oscilações na oferta de energia térmica nos fornos em decorrência da utilização de madeiras com PCI's distintos, como vem acontecendo nas circunstâncias atuais.

O cultivo do capim-elefante na região também pode contribuir para a oferta de alimento para o gado dos produtores locais em períodos de seca, uma vez que a silagem da cultura tem-se mostrado uma fonte de suplementação barata e de boa qualidade para sistemas de produção de gado de leite e de corte (BARCELOS et al., 2018; LIRA et al., 2018).

c) Melhorias no tratamento de efluentes

O Manual de Referência para Casas de Farinha do SEBRAE/AL (2006) aponta que o tratamento da manipueira pode ser realizado em lagoas de decantação (270 m³) seguidas de lagoas de estabilização (2.700 m³). Contudo, não há área útil no terreno da unidade para conceber um sistema do porte como o apontado pelo SEBRAE/AL.

Logo, torna-se necessário considerar tecnologias de tratamento mais simples, compactas e de fácil operação. Apesar do tratamento da manipueira em reatores

anaeróbios ter sido extensivamente estudado e apresentar muitas potencialidades como apontado no Capítulo 3, a operação de um reator para recuperação de biogás não é viável na casa de farinha, já que a produção anual na unidade se dá em apenas quatro meses do ano.

Neste sentido, o uso da fossa biodigestora modelo EMBRAPA pode ser uma alternativa viável para o tratamento da água residuária. O conjunto desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária é comumente empregado em áreas rurais ou isoladas do Brasil onde não há coleta e tratamento dos despejos (DA SILVA et al., 2017; DE LIMA et al., 2020). O modelo se destaca por sua flexibilidade de uso e simplicidade operacional, além de permitir a utilização do efluente estabilizado como biofertilizante.

Na operação da fossa, os efluentes são digeridos em ambiente anaeróbio sem o uso de energia elétrica. O conjunto convencional utiliza três módulos com capacidade para 1.000 litros cada, sendo dois destinados à fermentação e uma caixa coletora para o armazenamento do efluente já estabilizado (EMBRAPA, 2017). O sistema pode ser adequado para volumes maiores acoplando mais módulos ao conjunto.

Para que a efetividade do tratamento seja garantida, o Manual de Montagem e Operação da Fossa Biodigestora (EMBRAPA) (2017) relata que é necessário aplicar mensalmente 5 litros de esterco bovino diluídos em 5 litros de água. Considerando que grande parte dos produtores de mandioca envolvidos na casa de farinha criam gado, adquirir o esterco bovino e aplicá-lo na fossa não será uma limitação para o uso.

Atualmente, esta é uma solução voltada para o tratamento de efluentes domésticos (sem adição de sabão, desinfetantes ou gorduras) que ainda não foi aplicada para o tratamento da manipueira, mas que pode ser estudada e aprimorada para esta e outras aplicações agroecológicas, dada a dimensão do desafio do tratamento adequado de efluentes em regiões rurais do Brasil (DE LIMA et al., 2020; FIGUEIREDO et al., 2019; POSTIGO et al., 2017).

Na unidade estudada, o emprego desta tecnologia pode colaborar para atingir dois objetivos: mitigar os impactos ambientais causados pelo alta toxicidade da manipueira e recuperar um bioproduto de valor agregado (SÁNCHEZ et al., 2017; ZHANG et al., 2016).

A recuperação do efluente estabilizado para uso como biofertilizante em lavouras de culturas utilizadas pela comunidade pode contribuir para aumentar o retorno econômico das famílias também em outras atividades. Na localidade, o cultivo da palma

forrageira é explorado para garantir o suprimento alimentar do rebanho bovino durante o período de seca. Esta é uma prática comum em regiões áridas e semiáridas do Nordeste brasileiro em razão do alto teor energético e da capacidade da planta de suportar períodos longos de estiagem (EMBRAPA, 2012).

No cenário atual, o descarte da manipueira sem tratamento é realizado diretamente em uma plantação de palma. De acordo com os entrevistados, a aplicação do efluente *in natura* no solo onde está a plantação traz consequências positivas (maior rendimento) ou negativas (morte da planta), a depender do período do despejo e da concentração do efluente. Durante a visita à unidade, os produtores e administradores relataram que não compreendem quais são os fatores que influenciam nas consequências danosas, mas que a aplicação traz benefícios em alguns períodos e por isso dão continuidade às práticas. Além disso, ressaltaram que gostariam de obter mais informações para realizar um manejo adequado do efluente.

Trabalhos recentes estudaram a aplicação da manipueira *in natura* no solo em plantações de culturas diferentes, tais como: milho (RAMOS et al., 2019), soja (ANDERLE, HANAUER E HERMES, 2020), feijão (PEREIRA et al., 2018) e girassol (DANTAS et al., 2017). Em todas as investigações verificou-se que a utilização pode contribuir para o crescimento das plantas, mas depende diretamente da dose aplicada, porque altas concentrações podem alterar o pH e o balanço de nutrientes. Portanto, apesar da possibilidade de utilizar o efluente estabilizado e com toxicidade reduzida como biofertilizante nas lavouras de palma, é necessário que o uso seja estudado e orientado por profissionais.

A aplicação do bio sólido gerado pelo tratamento anaeróbico no solo também apresenta potencialidades de reúso. Esta é uma alternativa ambientalmente adequada que se enquadra nos princípios de reciclagem de resíduos (BRASIL, 2010). O resíduo deve ser caracterizado e, em caso de necessidade, submetido a processos de tratamento para ser enquadrado e então utilizado para os devidos fins como determina a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 498/2020 que define os critérios para aplicação de bio sólidos no solo (BRASIL, 2020).

O tratamento adequado e a recuperação de bioprodutos têm um impacto positivo e podem trazer benefícios econômicos e ambientais à cadeia produtiva da farinha. As vantagens do tratamento adequado, seguido da aplicação de bioprodutos da digestão anaeróbia de resíduos e efluentes em cenários de produção mais limpa, têm sido relatados na literatura. O estudo de Narayanaswamy et al. (2003) avaliou o impacto de medidas de

produção mais limpa para reduzir danos ambientais e retornos econômicos. Os resultados mostraram que o tratamento anaeróbio do efluente traz benefícios econômicos e ambientais ao reduzir a carga poluente das águas residuárias e as emissões de gases de efeito estufa.

Padi e Chimphango (2020b) examinaram a viabilidade comercial de tratar a água residuária do processamento de mandioca e recuperar recursos e verificaram que a conversão de resíduos em produtos de valor como biofertilizante pode garantir uma linha de produção mais sustentável, além de possibilitar a expansão dos lucros.

Em outro trabalho, Madeira et al. (2017) relataram que as eficiências ecológicas em cenários onde há tratamento do efluente são excelentes do ponto de vista ambiental. Os achados corroboram com outras pesquisas sobre o tema e também relatam que o tratamento da água residuária e a recuperação de bioprodutos de valor colaboram para que a cadeia produtiva da mandioca se torne mais sustentável.

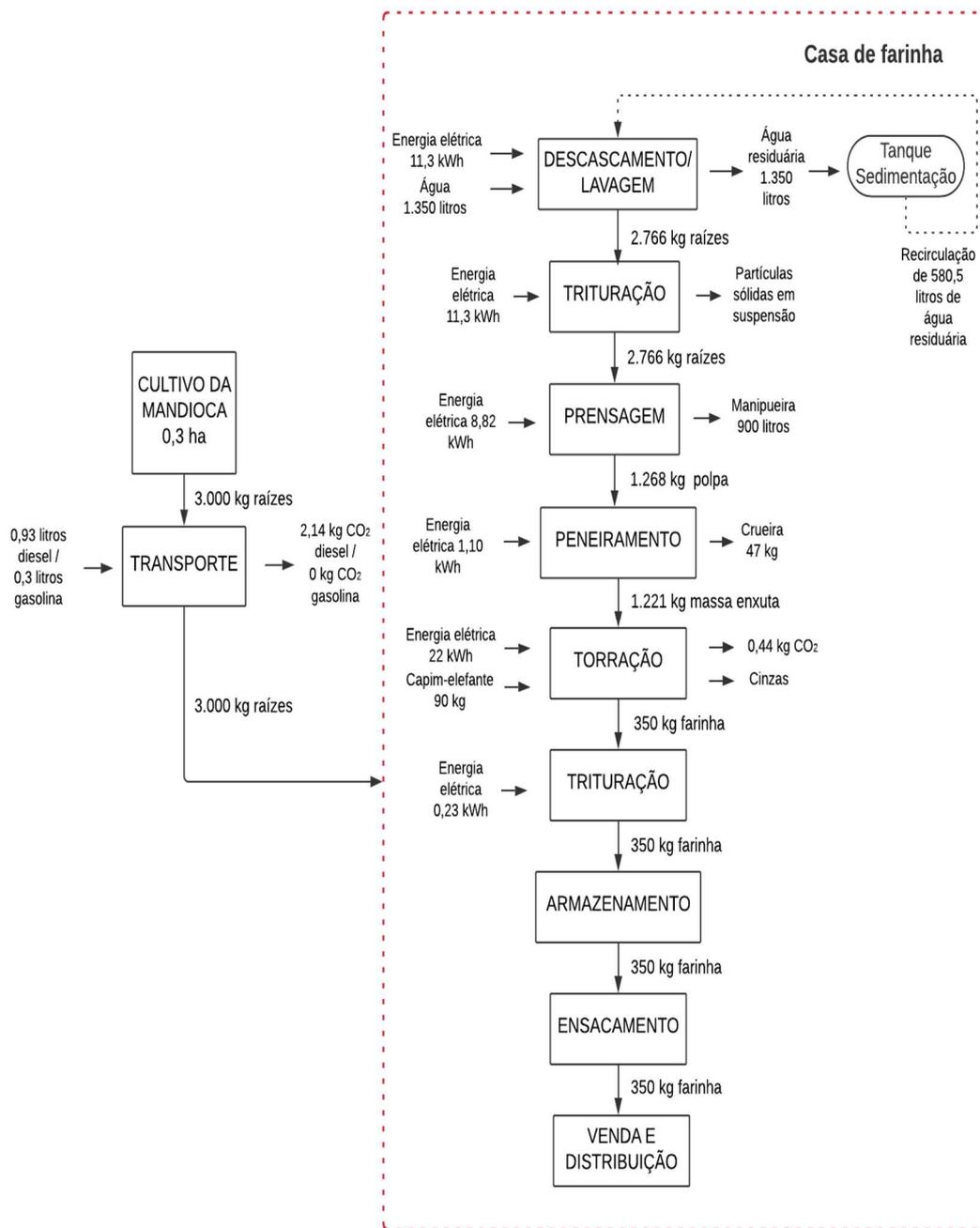
d) Melhorias no transporte das raízes e da farinha

Atualmente, o setor de transportes é um dos principais usuários de combustíveis fósseis e contribuintes em termos de emissões de CO₂ (TONGROON et al., 2019). Apesar da menor contribuição em relação às demais categorias, este é um campo chave para alcançar as metas estabelecidas no acordo de Paris (MOREIRA E PACCA, 2020; RAZA E LIN, 2020). Assim, a estratégia adotada com intuito de diminuir o impacto ambiental do transporte das raízes será incentivada pelo Programa Nacional do Biodiesel e o Programa Nacional do Álcool do governo brasileiro que têm como objetivo estimular o uso de biocombustíveis como etanol e biodiesel. Desta forma, será considerado que o uso de etanol e diesel com uma parcela de biodiesel irá contribuir para diminuir as emissões de gases de efeito estufa, assim como demonstrado por Raza e Lin (2020) e Tongroon et al. (2019).

4.3.6 Cenários de aplicação das melhorias

Os resultados a seguir mostram o fluxo de matéria e energia ao longo da cadeia de processamento no cenário melhorado (Figura 4.18). Na discussão são apresentadas as contribuições da incorporação das melhorias em cada uma das etapas em relação ao cenário base.

Figura 4.18 - Fluxos de matéria e energia no processamento de 3 toneladas de mandioca para produção de farinha no cenário melhorado.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

a) Consumo de água

O uso do lavador descascador implicará na utilização de 1.350 litros de água por dia. Espera-se que acoplamento do tanque de sedimentação resulte na economia de 580,5 litros, como relatado por DA et al. (2010). Logo, a utilização do equipamento em conjunto

com o reúso da água residuária resultará no gasto de 769,5 litros por dia e 43.092 litros por ano.

Este valor é 35% superior ao consumo atual diário quando há lavagem úmida, mas espera-se que a lavagem das raízes em todas as bateladas de produção acarrete em ganhos quanto ao rendimento final do produto, conforme relatado pelos administradores da casa de farinha e pela literatura técnica (DA et al., 2010; PINGMUANGLEK, JAKRAWATANA E GHEEWALA, 2017; TRAN et al., 2015).

Além de contribuir para aumentar o rendimento final, o uso de um lavador descascador irá permitir ainda a economia de água na propriedade dos produtores rurais, já que as etapas de descascamento e lavagem serão executadas na unidade de processamento (Figura 4.18).

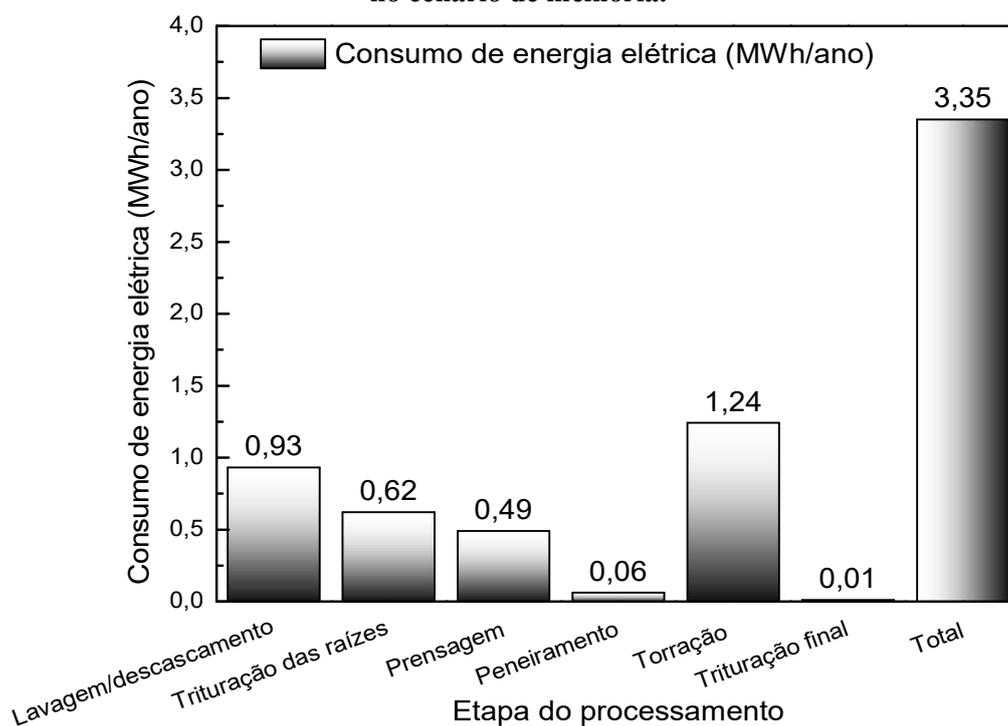
b) Consumo de energia elétrica e térmica

Considerando o incremento de melhorias para garantir o pleno funcionamento do maquinário, o consumo total de eletricidade para processar 168 toneladas de mandioca ao longo dos quatro meses de operação é de 3,04 MWh, 25% menor que o cenário atual.

A diminuição do consumo será possível apesar do incremento de dois equipamentos elétricos (lavador descascador e peneira vibratória), evidenciando que assegurar que o maquinário irá operar dentro do rendimento previsto pelo fabricante irá colaborar para aumentar a eficiência energética da planta, como relatado por Pingmuanglek, Jakrawatana e Gheewala, (2017).

A Figura 4.19 traz a parcela de consumo de energia de cada um dos equipamentos utilizados no cenário de melhorias. A prensagem apresentou a maior redução no consumo em comparação com a situação atual (253%), uma vez que foi verificado que a prensa de 400 kg/h está operando abaixo da sua capacidade e merece maior atenção. Assim, a prensagem passa da segunda maior consumidora para a quarta.

Figura 4.19 - Porcentagem do consumo anual de energia elétrica por etapa do processo no cenário de melhoria.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A etapa que mais consome ainda é a torração (1,24 Wh), porém haverá redução de 37,4% na demanda por energia caso as medidas de melhoria sejam implementadas. Já para a trituração das raízes, o aperfeiçoamento resultará na redução de 24,4% na demanda por eletricidade em relação ao cenário atual. A trituração final da farinha continua consumindo a mesma quantidade de energia elétrica em relação ao cenário base (0,01 Wh). A incorporação do lavador descascador com motor elétrico demandará 27,7% do total consumido e o peneiramento 1,8% (Figura 4.19).

Quanto à oferta de energia térmica, a queima direta de capim-elefante fornecerá 1.544 MJ/d. Portanto, a substituição irá implicar em um aumento de 2,2 % da oferta energética e contribuirá para estabilizar o uso de energia térmica de qualidade ao longo de toda a operação, uma vez que nas circunstâncias atuais o uso de diferentes tipos de lenha acarreta em déficits energéticos em algumas ocasiões.

c) Tratamento de efluentes

A manipueira (50,4 m³) e a água residuária após o uso e reciclagem nos lavadores descascadores (87 m³) serão despejadas em uma fossa séptica biodigestora modelo EMBRAPA. A diluição da manipueira na água residuária irá diminuir a carga orgânica e a toxicidade do efluente, assim como ocorre nas fecularias (efluente mais diluído em

relação às casas de farinha) (SOUZA et al., 2014). Após o tratamento anaeróbio, o biofertilizante recuperado será utilizado em uma plantação de palma na área externa da casa de farinha, seguindo orientações técnicas.

d) Emissão de gases de efeito estufa

O total de emissões de GEE da unidade de processamento no cenário de melhorias foi de 4.497 kgCO₂e. As emissões diretas da unidade foram de 4.246 kgCO₂e (94%) e as indiretas foram de 251 kgCO₂e (6%) (Tabela 4.12).

Em relação às categorias das emissões diretas, tem-se que os efluentes foram os principais responsáveis pelas emissões totais de GEE (4.075 kgCO₂e), assim como no caso base (Tabela 4.12). Contudo, observa-se que o aumento da geração de efluentes em conjunto com uso da fossa biodigestora neste cenário implicará no incremento de 480% nas emissões de GEE em relação à disposição em vala aberta. Apesar da alta nas emissões, é necessário utilizar tecnologias de tratamento adequadas para diminuir a carga orgânica e a toxicidade do efluente. Além disso, o tratamento e a recuperação do biofertilizante irão acarretar em ganhos ambientais e econômicos, como já foi discutido nas seções anteriores.

Tabela 4.12 - Emissões totais de GEE por categoria de emissões diretas e indiretas no cenário de melhoria.

Escopo	Categoria	Emissão (kgCO ₂ e)	Emissões totais (kgCO ₂ e)
Escopo 1	Combustão estacionária	25	4.221
	Combustão móvel	121	
	Efluentes	4.075	
Escopo 2	Energia elétrica	251	251
Total			4.472

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto à combustão estacionária, as emissões de 25 kgCO₂e referem-se à queima de 5 toneladas de capim-elefante para o fornecimento de energia térmica para a torração da farinha nos fornos. Logo, a substituição implicará em uma redução de 67% nas emissões de CO₂.

Quanto a combustão móvel, a emissão dos 120 kgCO₂e foram referentes ao consumo de 51,96 litros de diesel e 24 litros de etanol. O uso de diesel pelo trator agrícola foi responsável por 120 kgCO₂e e a substituição da gasolina pelo etanol no veículo leve por 0 kgCO₂e, já que este é um biocombustível (Tabela 4.13). Logo, a substituição pelo biocombustível colaborou para diminuir as emissões do transporte em 18,2% em

comparação com o cenário base. Apesar da diminuição, ressalta-se que estes valores referem-se apenas às emissões de GEE (CO₂, CH₄ e N₂O), mas na combustão também há emissão de hidrocarbonetos, material particulado, NO_x, SO_x, entre outros, que não foram quantificados neste trabalho.

Tabela 4.13 - Consumo anual e emissões de GEE por tipo de combustível consumido na frota utilizada no cenário de melhoria.

Tipo de combustível	Consumo anual (L)	Emissões			Emissões totais (tCO ₂ e)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Diesel	51,96	120	0	0	120
Etanol	24	0	0	0	0
Total	75,96				120

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No escopo 2, a redução de 25% no consumo de eletricidade ao longo dos quatro meses de operação implicou na emissão de 251 kgCO₂e, uma redução de 17% em relação ao caso base (Tabela 4.14). Apesar da diminuição, o consumo de energia elétrica continuará sendo o terceiro segmento que mais contribui para as emissões totais de gases de efeito estufa na casa de farinha.

Tabela 4.14 - Emissões atribuídas ao consumo de eletricidade no cenário de melhoria.

Ano	Fator de emissão (kgCO ₂ /Mwh)	Consumo (MW/ano)	Emissões (kgCO ₂ e)
2019	74	3,34	251

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto as emissões de CO₂ biogênicas, tem-se que a queima do capim-elefante para fornecer energia térmica aos fornos (combustão estacionária) foi responsável por 99,9% do total (4.463 tCO₂ biogênicas) e o uso de diesel com um percentual de biodiesel e etanol (combustão móvel) foram responsáveis por 0,01% (0.048 tCO₂ biogênicas) (Tabela 4.15). Apesar de não haverem diferenças quanto à contribuição de cada uma das categorias, o uso do capim-elefante reduziu em 54% as emissões biogênicas na combustão estacionária em relação ao caso base. A diminuição se deu porque os fatores de emissão de gases de efeito estufa do capim-elefante são inferiores aos da lenha.

Tabela 4.15 - Emissões de CO₂ biogênicas por categoria no cenário de melhoria.

Escopo	Categoria	Emissões tCO ₂ biogênicas
Escopo 1	Combustão estacionária	4.463
	Combustão móvel	0,048
Total		4.463

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.4 CONCLUSÃO

Neste estudo, a avaliação da gestão de água, resíduos, efluentes e eletricidade e a quantificação de emissões de gases de efeito estufa em uma casa de farinha de pequeno porte mostrou que adequações são necessárias para que a linha de produção se torne mais eficiente e menos poluidora.

Melhorias na gestão da água e dos efluentes mostram-se um ponto importante em direção à uma cadeia mais sustentável. Quanto às mudanças nas etapas do processamento, a incorporação de lavadores descascadores mostra-se uma alternativa promissora para concentrar as etapas de lavagem e descascamento na unidade e aumentar o rendimento do produto final. Espera-se que o uso de tanques de sedimentação acoplados aos lavadores descascadores permitam a reciclagem de até 43% de água na unidade, como apontado na literatura.

Quanto à gestão da manipueira, a ausência de tratamento possui alto potencial para causar consequências danosas ao solo e aos corpos hídricos. O uso de uma fossa biodigestora modelo EMBRAPA adaptada para o tratamento do efluente pode contribuir para tratar o efluente e recuperar um bioproduto de valor agregado que pode ser utilizado para aumentar o rendimento do cultivo de palma na comunidade, como é de interesse dos produtores locais e administradores da casa de farinha.

A adoção de um plano de manutenção periódica para garantir que os equipamentos trabalhem dentro da eficiência estimada pelo fabricante pode diminuir o consumo de eletricidade em até 25% ao ano. Outros ganhos em eficiência também podem ser alcançados a partir da lavagem das raízes em todas as bateladas e do uso de peneiras vibratórias, mas não foi possível quantificá-los neste trabalho.

Quanto à fonte de energia térmica, verificou-se que a substituição da lenha do extrativismo vegetal pelo capim-elefante implicará em 2,2% de aumento na oferta energética nos fornos e ajudará a diminuir a supressão da vegetação da Caatinga na região.

A quantificação das emissões de GEE mostrou que, no cenário de melhoria, as emissões relacionadas à queima de lenha, transporte e compra de energia elétrica tiveram queda de 67%, 18,2% e 17%, respectivamente. Os efluentes foram os maiores responsáveis pela emissão de CO₂e no processo nos dois cenários avaliados. No contexto de melhoria, a utilização da fossa biodigestora implicou ainda no aumento de 480% nas emissões dos efluentes, em razão da produção de CH₄ oriunda na digestão anaeróbia da água residuária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo 3, a análise bibliométrica mostrou-se uma boa ferramenta para verificar as tendências das pesquisas acerca da digestão anaeróbia da água residuária do processamento de mandioca ao longo do tempo.

No período entre 1980 e 1990, os estudos centraram-se em avaliar o potencial do efluente para produção de biogás e bioetanol.

Entre 1991 e 2000, os estudos focados duas frentes: verificar a presença de cianeto na água residuária e avançar no tratamento anaeróbio.

Após verificar que o cianeto de hidrogênio é tóxico às arqueias metangênicas e prejudica a recuperação do biogás, entre 2001 e 2020 houveram mais avanços no tratamento anaeróbio. Neste período, os experimentos centraram-se em aumentar a eficiência de remoção de matéria orgânica e também do cianeto. O aprimoramento esteve relacionado com a diversificação de configurações de reatores (ASBR, CSTR, UASB, fluxo pistonado, filtro anaeróbio de fluxo horizontal) e de regimes de operação que variaram parâmetros importantes para a digestão anaeróbia (Temperatura, pH, Carga Orgânica Volumétrica e Tempo de Detenção Hidráulica).

Já entre 2011 e 2020, a otimização das técnicas de biologia molecular (PCR/DGGE, *FISH*, Sequenciamento) mostraram-se importantes para que os estudos pudessem relacionar os parâmetros físico-químicos monitorados nos sistemas com a dinâmica da comunidade microbiana. Neste sentido, as contribuições têm ajudado a elucidar qual é o papel dos microrganismos dominantes em condições de equilíbrio e desequilíbrio do tratamento anaeróbio do efluente e, assim, as pesquisas puderam alcançar operações mais estáveis a longo prazo.

Além disso, notou-se que os trabalhos deste período buscavam investigar questões relacionadas com as mudanças climáticas, sobretudo a quantificação de emissões de gases de efeito estufa nas cadeias produtivas e a prospecção de benefícios econômicos e ambientais da implementação de melhorias na gestão de recursos, resíduos e efluentes em cenários reais.

De forma geral, a aplicação do tratamento anaeróbio do efluente do processamento de mandioca ainda está concentrada em países asiáticos como China, Índia, Tailândia e Vietnã. Apesar de figurarem na lista de maiores produtores de mandioca do mundo, países como Brasil e Colômbia ainda estão dando os primeiros passos em direção a utilização de reatores anaeróbios em escala plena nas linhas produtivas de derivados de mandioca.

No capítulo 4, as dificuldades para adequar as soluções propostas nos trabalhos técnicos para a realidade do Agreste alagoano mostraram que ainda existem muitas limitações na literatura com relação a tecnologias de tratamento voltadas para produção em escala pequena ou artesanal, sobretudo em zonas rurais.

A transferência de tecnologia de soluções já consolidadas em outros países ou nas regiões Sul e Sudeste do Brasil para a região Nordeste é dificultada porque os processos visam produzir derivados diferentes, que demandam quantidades de água distintas e resultam em efluentes com concentrações de matéria orgânica e compostos cianogênicos igualmente distintas.

Neste sentido, verifica-se que para superar os desafios da produção mais sustentável em casas de farinha do Agreste alagoano é preciso investir em diagnósticos para levantar as especificidades da cadeia de processamento de mandioca em Alagoas e apontar a viabilidade técnica e econômica das propostas. Além disso, nota-se que é necessário que uma série de políticas públicas sejam implementadas com vistas a fortalecer esta cadeia na região. Atualmente, o programa de incentivos do Arranjo Produtivo Local (APL) da mandioca de Alagoas encontra-se descontinuado e os produtores e administradores envolvidos na produção de farinha de unidades de pequeno porte têm encontrado desafios para dar continuidade aos trabalhos.

Logo, o desenvolvimento de um programa amplo com o objetivo de investigar as deficiências, organizar os produtores em cooperativas e viabilizar a implementação de melhorias em casas de farinha alagoanas poderá contribuir para que o produto da região seja certificado e, assim, haverá incremento no retorno econômico aos trabalhadores envolvidos.

6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Quantificar resíduos e efluentes ao longo da linha de produção da casa de farinha estudada neste trabalho;

- Avaliar as emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva de farinha de mandioca considerando as emissões provenientes do manejo do solo no cultivo do tubérculo;

- Avaliar o uso de uma fossa séptica biodigestora modelo EMBRAPA, ou outra solução de baixo custo, para tratar a manipueira de casas de farinha;

- Examinar a implementação da Produção Mais Limpa em uma casa de farinha;

- Estudar de viabilidade técnica e econômica da implementação das melhorias propostas neste trabalho;

- Estudar a aplicação da manipueira no solo no cultivo da palma forrageira.

REFERÊNCIAS

ADELEKAN, B. A.; BAMGBOYE, A. I. Comparison of biogas productivity of cassava peels mixed in selected ratios with major livestock waste types. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 7, p. 571–577, jul. 2009.

AHMAD ROMADHONI SURYA PUTRA, R.; LIU, Z.; LUND, M. The impact of biogas technology adoption for farm households – Empirical evidence from mixed crop and livestock farming systems in Indonesia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier Ltd, , 1 jul. 2017.

AHOU, Y. S. et al. Lab-scale anaerobic digestion of cassava peels: the first step of energy recovery from cassava waste and water hyacinth. **Environmental technology**, p. 1-14, 2019.

ALBUQUERQUE, F. D. B. et al. Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: Current status, benchmarking, and assessment tools. **Transportation Research Procedia**. Elsevier B.V., 1 jan. 2020.

ALENE, A. D. et al. Identifying crop research priorities based on potential economic and poverty reduction impacts: The case of cassava in Africa, Asia, and Latin America. **PLoS ONE**, v. 13, n. 8, 1 ago. 2018.

ALIBARDI, L. et al. **Organic waste biorefineries: Looking towards implementation** **Waste Management**. Elsevier Ltd, , 1 ago. 2020.

AMORIM, M. C. C. et al. Viability of rapid startup and operation of UASB reactors for the treatment of cassava wastewater in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 96, n. 5, p. 1036–1044, 1 maio 2018.

AMORIM, N. C. S. et al. Biohydrogen production from cassava wastewater in an anaerobic fluidized bed reactor. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 3, p. 603–612, 1 jul. 2014.

AMORIM, N. C. S. et al. The effect of methanogenesis inhibition, inoculum and substrate concentration on hydrogen and carboxylic acids production from cassava wastewater. **Biodegradation**, v. 29, n. 1, p. 41–58, 1 fev. 2018.

ANDERLE, G. A.; HANAUER, T. V.; HERMES, E. Development of soybean plants with mineral fertilization and cassava wastewater biofertilizer. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 3, p. 1129–1143, 14 ago. 2020.

ANGONESE, A. R. et al. Energy efficiency of swine production system with biodigestor waste treatment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 745–750, 2006.

ARAÚJO, N. C. DE et al. Quantificação da geração de resíduos em casas de farinha no estado da paraíba. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 3793–3799, 16 dez. 2014.

ARAUJO, I. R. C. et al. Methane production from cassava starch wastewater in packed-bed reactor and continuous flow. **Engenharia Agricola**, v. 38, n. 2, p. 270–276, 1 mar. 2018.

AZEVEDO, J. C. R. DE; NOZAKI, J. Determinação de cianeto em efluentes de feculárias por polarografia de pulso diferencial. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 39, n. 1, p. 149–155, 1996.

BNB - Banco do Nordeste. Produção de mandioca - Raiz, Farinha e Fécula. **Caderno Setorial ETENE**, v. 4, n. 102, p. 1-11, nov. 2019.

BARCELOS, A. F. et al. Nutritional value and characteristics of elephant grass silage with different proportions of coffee hulls. **Ciencia Animal Brasileira**, v. 19, n. 19, 2018.

BARRETO, M. T. L. et al. Atributos químicos de dois solos submetidos à aplicação de manipueira. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 4, p. 528–534, 2013.

BEGUM, S.; ANUPOJU, G. R.; ESHTIAGHI, N. Anaerobic co-digestion of food waste and cardboard in different mixing ratios: Impact of ultrasound pre-treatment on soluble organic matter and biogas generation potential at varying food to inoculum ratios. **Biochemical Engineering Journal**, p. 107853, 12 nov. 2020.

BENGTSSON, B. E.; TRIET, T. Tapioca-starch wastewater toxicity characterized by Microtox and duckweed tests. **Ambio**, v. 23, n. 8, p. 473–477, 1994.

BOONAPATCHAROEN, N. et al. Molecular monitoring of microbial population dynamics during operational periods of anaerobic hybrid reactor treating cassava starch wastewater. **Microbial Ecology**, v. 54, n. 1, p. 21–30, jul. 2007.

BRANDÃO, T. B. C. **Caracterização da qualidade da farinha de mandioca produzida no Agreste alagoano**. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/620>>. Acesso em: 22 nov. 2020.

BRASIL. **Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências**. Brasília: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 03 mar. 2021.

BRASIL. Resolução nº 498 de 19 de agosto de 2020. **Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos e dá outras providências**. Brasília: Diário Oficial da União, 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>>. Acesso em 03 mar. 2021.

CARBONE, S. R. et al. Bacterial population of a two-phase anaerobic digestion process treating effluent of cassava starch factory. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 23, n. 5, p. 591–597, 1 maio 2002.

CHAIPRASERT, P. et al. Nylon fibers as supporting media in anaerobic hybrid reactors: It's effects on system's performance and microbial distribution. **Water Research**, v. 37, n. 19, p. 4605–4612, 2003.

CHAVADEJ, S. et al. Separate production of hydrogen and methane from cassava wastewater with added cassava residue under a thermophilic temperature in relation to digestibility. **Journal of Biotechnology**, v. 291, p. 61–71, 10 fev. 2019.

CHAVALPARIT, O.; ONGWANDEE, M. Clean technology for the tapioca starch industry in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 2, p. 105–110, 1 jan. 2009.

CHEN, D. et al. Bibliometric and visualized analysis of energy research. **Ecological Engineering**, v. 90, p. 285–293, 1 maio 2016.

CEREDA, M. et al. Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca. **São Paulo: Fundação Cargill**, v. 4, p. 210-217, 2001.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados Em Econo-Mia Aplicada. **Mandioca**. 2019. Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/man-dioca.aspx>. Acesso em: 30 nov. 2020.

COLIN, X. et al. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 8, p. 1602–1607, maio 2007.

CORRÊA, H. **Avaliação do Ciclo de Vida da Farinha de Mandioca**. 2018. 139f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Universidade Federal do Oeste do Pará.

Disponível em:

<<http://www.ufopa.edu.br/media/file/site/ufopa/documentos/2020/565ff58d4215837f755a65e707b49312.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

CUZIN, N. et al. Methanogenic fermentation of cassava peel using a pilot plug flow digester. **Bioresource Technology**, v. 41, n. 3, p. 259–264, 1992.

CUZIN, N.; LABAT, M. Reduction of cyanide levels during anaerobic digestion of cassava. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 27, n. 3, p. 329–336, 1992.

DA, G. et al. Cassava Starch Processing at Small Scale in North Vietnam. **Starch - Stärke**, v. 60, n. 7, p. 358–372, 1 jul. 2008.

_____. Modeling small-scale cassava starch extraction. Simulation of the reduction of water consumption through a recycling process. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 11, p. 1837–1842, nov. 2010.

DA SILVA, J.S. **Inventário e Gerenciamento das Emissões de Gases de Efeito Estufa: Estudo de Caso em Companhia de Saneamento**. 2020. 101f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

DA SILVEIRA, F. G. et al. Capim-elefante: Um recurso bioenergético. **Nucleus Animalium**, v. 10, n. 2, p. 117-130, 2018. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6814729.pdf>>. Acesso 20 jan. 2021.

DANTAS, M. S. M. et al. The use of “manipueira” wastewater derived from cassava processing as organic fertilizer in sunflower cultivation. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 7, p. 861–867, 2017.

DE ARRUDA, et al. Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica Do IFPB**, v. 1, n. 30, p. 18, 2016.

DE OLIVEIRA, H. B. **Análise imediata e avaliação do poder calorífico superior das espécies Combretum leprosum Mart.(MOFUMBO) e Anadenanthera macrocarpa (Benth.) Brenan (ANGICO)**. 2018. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: < http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54927/3/2018_tcc_hbdoliveira.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2021.

DE LIMA, F. C. et al. Biodigestive septic tanks: Case study focused on the Santana do Aurá-Belém/PA School. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. 65973764, 2020.

DINIZ, E. H. *et al.* Greening inventories: Blockchain to improve the GHG Protocol Program in scope 2. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, p. 125900, 1 abr. 2021.

DORAISAMY, P. et al. Comparative performance of anaerobic reactors for treatment of sago industry wastewater. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 15, n. 2, p. 391–394, abr. 2013.

DOURADO et al. Caracterização bromatológica e classificação da casca da mandioca como fonte para alimentação animal. **Revista Integralização Universitária**, v. 12, n. 16, p. 1-22, 2017.

DUARTE, A. DE S. et al. Changes in physical and chemical properties of soil after application of cassava wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 9, p. 938–946, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Efeito do Processo de Fabricação da Farinha de Mandioca**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 73 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/903120/1/Doc.267.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

_____. **Palma Forrageira no Nordeste do Brasil: Estado da Arte**. Sobral, CE: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2012. 40 p. Disponível em: < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/979108/1/DOC106.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2021.

_____. **Cultura da mandioca**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 208 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/112346/1/Apostila-Mandioca.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

_____. **Capim-elefante como biomassa para produção de energia**. Aracajú, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 2 p. Disponível em: <

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1113008/1/LVMandiocaRentabilidade1209225.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2020.

_____. **Manual descritivo: montagem e operação da fossa séptica biodigestora**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2017. 22 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/168156/1/Doc-serie-Embrapa-Fossa-septica.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2021.

_____. **Mandioca em números**. Brasília, DF: Embrapa Amazônia Oriental, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

_____. **Mandioca: agregação de valor e rentabilidade de negócios**. Brasília, DF: Embrapa Amazônia Oriental, 2019. 223 p. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1113008/1/LVMandiocaRentabilidade1209225.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2020.

FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 44, p. 99–123, abr. 2002.

FERREIRA, M. S. Avaliação bromatológica dos resíduos da industrialização da mandioca e seu aproveitamento em ração para animais ruminantes. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 3, n.1, p. 105-109, jul. 2013.

FERREIRA, L. R.A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, n. April 2017, p. 440–455, 2018.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol - Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 2018. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/arquivos.gvces.com.br/arquivos_ghg/152/especificacoes_pb_ghgprotocol.pdf . Acesso em 12 dez. 2020.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. Programa Brasileiro GHG Protocol. **Ferramenta Intersetorial GHG Protocol v2020.2**. 2020. Disponível em: <<https://www.ghgprotocolbrasil.com.br/ferramenta-de-calculo>>. Acesso em 12 dez. 2020.

FIGUEIREDO, I. C. S. et al. Fossa Séptica Biodigestora: avaliação crítica da eficiência da tecnologia, da necessidade da adição de esterco e dos potenciais riscos à saúde pública. **Rev. Saneamento Rural**, p. 100, 2019

FINNEGAN, S. et al. The carbon impact of a UK safari park – Application of the GHG protocol using measured energy data. **Energy**, v. 153, p. 256–264, 15 jun. 2018.

FLECK, L. et al. Optimization of the nitrification process of wastewater resulting from cassava starch production. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 40, n. 25, p. 3318–3327, 10 nov. 2019.

- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Cassava and products**. United Nations. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca7735en/CA7735EN.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2021.
- FORSTER-CARNEIRO, T. et al. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, p. 78–88, 1 ago. 2013.
- FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, n. October 2018, p. 146–157, 2019.
- FURTADO, J. C. et al. Biorefineries productive alternatives optimization in the brazilian sugar and alcohol industry. **Applied Energy**, v. 259, 1 fev. 2020.
- GABRIEL, L. F. et al. Climate change and its effects on cassava crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 90–98, 2014.
- GAVAZZA, S. et al. Caproic Acid Formation by Carbon Chain Elongation During Fermentative Hydrogen Production of Cassava Wastewater. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1–9, 22 jul. 2020.
- GIODA, A.; et al. P. Exposição ao uso da lenha para cocção no Brasil e sua relação com os agravos à saúde da população. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 24, p. 3079-3088, 2019.
- GOMES, F. A. **Produtividade de variedades de mandioca em diferentes arranjos de plantio, épocas de colheita, fisiologia do estresse e déficit hídrico**. 2018 86f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Recôncavo Baiano, Cruz das Almas, 2018.
- GONZÁLEZ DE DIOS, J.; ALONSO-ARROYO, A.; ALEIXANDRE-BENAVENT, R. Half a century of ANALES DE PEDIATRÍA. Evolution of its main bibliometric indicators in the Web of Science and Scopus international databases. **Anales de Pediatría**, v. 90, n. 3, p. 194.e1-194.e11, 1 mar. 2019.
- HAN, Z. et al. Effects of different carriers on biogas production and microbial community structure during anaerobic digestion of cassava ethanol wastewater. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 38, n. 18, p. 2253–2262, 17 set. 2017.
- HANSUPALAK, N. et al. Biogas reduces the carbon footprint of cassava starch: a comparative assessment with fuel oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 134, n. Part B, p. 539–546, 15 out. 2016.
- HASSAN, W.; KAMDEM, J. P.; TEIXEIRA DA ROCHA, J. B. Research trends in chemico-biological interactions: The golden jubilee (1969–2019). **Chemico-Biological Interactions**, v. 327, n. May, p. 109177, 2020.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. **Produção agrícola - Lavoura temporária de mandioca em 2019**. Coordenação de Geografia - Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em:

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/pesquisa/14/10193?tipo=cartograma&indicador=10335>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

INTANOO, P. et al. Optimization of separate hydrogen and methane production from cassava wastewater using two-stage upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) system under thermophilic operation. **Bioresource Technology**, v. 173, p. 256–265, 1 dez. 2014.

INTANOO, P.; GULARI, E.; CHAVADEJ, S. Simultaneous production of hydrogen and methane from cassava wastewater using a two stage upflow anaerobic sludge blanket system under thermophilic operation. **Chemical Engineering Transactions**, v. 39, n. Special Issue, p. 1567–1572, 2014.

ISHOLA, M. M. et al. **Biofuels in Nigeria: A critical and strategic evaluation** **Renewable Energy**, jul. 2013.

JAKRAWATANA, N.; PINGMUANGLEKA, P.; GHEEWALA, S. H. Material flow management and cleaner production of cassava processing for future food, feed and fuel in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 134, n. Part B, p. 633–641, 15 out. 2016.

JAMUNA, R.; RAMAKRISHNA, S. V. SCP production and removal of organic load from cassava starch industry waste by yeasts. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 67, n. 2, p. 126–131, 1989.

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

JÜRGENS-GSCHWIND, S. Agriculture and energy with special reference to mineral fertilization. **Fertilizer Research**, v. 1, n. 3, p. 137–155, set. 1980.

KAMAHARA, H. et al. Reduction of greenhouse gas emissions by biogas utilization in a tapioca starch factory. **Kagaku Kogaku Ronbunshu**, v. 38, n. 5, p. 299–304, 2012.

KARTHIKEYAN, C.; SABARATHINAM, P. L. Biodegradation of cassava starch wastewater using Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. **Journal of Industrial Pollution Control**, v. 18, n. 1, p. 33–40, 2002.

KHONGKLIANG, P. et al. Continuous hydrogen production from cassava starch processing wastewater by two-stage thermophilic dark fermentation and microbial electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 45, p. 27584–27592, 2017.

KIANI, A. Electric vehicle market penetration impact on transport-energy-greenhouse gas emissions nexus: A case study of United Arab Emirates. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 386–398, 1 dez. 2017.

KUCZMAN, O. et al. Influence of hydraulic retention time on the anaerobic treatment of cassava starch extraction effluent using a one-phase horizontal reactor. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 11, n. 1, p. 1118–1120, 2013.

LAMAISON, F. C. **Aplicação da água residuária do processamento da mandioca como substrato para a produção de hidrogênio por processo fermentativo**. 2009.

85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/92304/269344.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso: 28 dez. 2020.

LANSCHÉ, J. et al. Potential of biogas production from processing residues to reduce environmental impacts from cassava starch and crisp production-a case study from Malaysia. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 8, 2020.

LI, L. et al. Estimations and uncertainty of biogenic volatile organic compound emission inventory in China for 2008–2018. **Science of the Total Environment**, v. 733, p. 139301, 1 set. 2020.

LIRA, B. et al. Characteristics of Pennisetum purpureum and passion-fruit-peel silages. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, n. 3, p. 905–912, 1 maio 2018.

LIU, X.; ZHANG, L.; HONG, S. Global biodiversity research during 1900–2009: A bibliometric analysis. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, n. 4, p. 807–826, abr. 2011.

LORA GRANDO, R. et al. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier Ltd, , 1 dez. 2017.

LUCAS, S. D. M. et al. Energy recovery from agro-industrial wastewaters through biohydrogen production: Kinetic evaluation and technological feasibility. **Renewable Energy**, v. 75, p. 496–504, 1 mar. 2015.

LUN, X. et al. Reviews of emission of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in Asia. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 95, p. 266–277, 1 set. 2020.

LUO, G. et al. Anaerobic treatment of cassava stillage for hydrogen and methane production in continuously stirred tank reactor (CSTR) under high organic loading rate (OLR). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 21, p. 11733–11737, 2010.

LUO, G.; XIE, L.; ZHOU, Q. Enhanced treatment efficiency of an anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) for cassava stillage with high solids content. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 107, n. 6, p. 641–645, jun. 2009.

MACHADO, J. S. T. et al. Potencial do capiaçu como biomassa energética. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 2, p. 56-62, 2019.

MADEIRA, J. G. F. et al. Ecological analysis of hydrogen production via biogas steam reforming from cassava flour processing wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 709–716, 2017a.

_____. Exergy analysis of hydrogen production from manipueira biogas. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, 2020.

MALANSKI, P. D.; DEDIEU, B.; SCHIAVI, S. **Mapping the research domains on work in agriculture. A bibliometric review from Scopus database** *Journal of Rural Studies* Elsevier Ltd, , 1 jan. 2020.

MANILAL, V. B.; NARAYANAN, C. S.; BALAGOPALAN, C. Anaerobic digestion of cassava starch factory effluent. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, v. 6, n. 2, p. 149–154, jun. 1990.

MAI-MOULIN, T. et al. Effective sustainability criteria for bioenergy: Towards the implementation of the european renewable directive II. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110645, mar. 2021.

MAO, G. et al. A Bibliometric Analysis of Industrial Wastewater Treatments from 1998 to 2019. **Environmental Pollution**, p. 115785, 7 out. 2020.

MARTINEZ-BURGOS, W. J. et al. Biohydrogen production in cassava processing wastewater using microbial consortia: Process optimization and kinetic analysis of the microbial community. **Bioresource Technology**, v. 309, n. January, p. 123331, 2020.

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

MENDIETA, O. et al. Management and valorization of waste from a non-centrifugal cane sugar mill via anaerobic co-digestion: Technical and economic potential. **Bioresource Technology**, v. 316, 1 nov. 2020.

MORAES, A. M.; MARTINS, G.; TRIGOSO, F. M. O uso do fogão à lenha no semiárido piauiense: um estudo de caso. **In: 7º Congresso Internacional sobre geração distribuída e energia no meio rural**. Fortaleza, Ceará; 2008. p.1-2.

Disponível em: <

https://www.researchgate.net/publication/266597718_O_USO_DO_FOGAO_A_LENHA_NO_SEMI-ARIDO_PIAUIENSE_UM_ESTUDO_DE_CASO>. Acesso em: 23 jan. 2021.

MOREIRA, J. R.; PACCA, S. A. The climate change mitigation potential of sugarcane based technologies for automobiles; CO2 negative emissions in sight. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 86, p. 102454, 1 set. 2020.

MURPHY, F.; MCDONNELL, K. Investigation of the potential impact of the Paris Agreement on national mitigation policies and the risk of carbon leakage; an analysis of the Irish bioenergy industry. **Energy Policy**, v. 104, p. 80–88, 2017.

NARAYANASWAMY, V. et al. Resource flow and product chain analysis as practical tools to promote cleaner production initiatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 4, p. 375–387, 1 jun. 2003.

NWACHUKWU, C. C.; LEWIS, C. A net energy analysis of fuels from biomass: the case of Nigeria. **Biomass**, v. 11, n. 4, p. 271–289, 1986.

- O-THONG, S. et al. Biohydrogen production from cassava starch processing wastewater by thermophilic mixed cultures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 5, p. 3409–3416, mar. 2011.
- OFOEFULE, A. U.; UZODINMA, E. O. Biogas production from blends of cassava (*Manihot utilissima*) peels with some animal wastes. **International Journal of Physical Sciences**, v. 4, n. 7, p. 398–402, jul. 2009.
- OMOJARO, P. A. Energy analysis for onsite and offsite suburban wastewater. **Environment, Development and Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 519–533, jun. 2011.
- OKWUONU, I. C. et al. Opportunities and challenges for biofortification of cassava to address iron and zinc deficiency in Nigeria. **Global Food Security**, v. 28, p. 100478, 1 mar. 2021.
- OLIVEIRA CHAVES, Y. A. DE et al. Performance Study of a Microturbine System for Cogeneration Application Using Biogas from Manipueira. **Bioenergy Research**, v. 13, n. 2, p. 659–667, 1 jun. 2020.
- OLUKANNI, D. O.; OLATUNJI, T. O. Cassava waste management and biogas generation potential in selected local government areas in Ogun State, Nigeria. **Recycling**, v. 3, n. 4, 2018.
- OLIVEIRA, M. A.; REIS, E. M.; NOZAKI, J. Biological treatment of wastewater from the cassava meal industry. **Environmental Research**, v. 85, n. 2, p. 177–183, 2001.
- OLUKANNI, D. O.; OLATUNJI, T. O. Cassava waste management and biogas generation potential in selected local government areas in Ogun State, Nigeria. **Recycling**, v. 3, n. 4, 2018.
- PACHECO, A. D. C. Inter-relações entre saúde e ambiente de trabalho em casas de farinha. 2017. 115f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26058>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- PADI, R. K.; CHIMPHANGO, A. Commercial viability of integrated waste treatment in cassava starch industries for targeted resource recoveries. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121619, 2020a.
- _____. Feasibility of commercial waste biorefineries for cassava starch industries: Techno-economic assessment. **Bioresource Technology**, v. 297, 1 fev. 2020b.
- _____. Comparative sustainability assessments for integrated cassava starch wastes biorefineries. **Journal of Cleaner Production**, p. 125171, 18 nov. 2020c.
- PAI, R. R.; ALATHUR, S. Bibliometric Analysis and Methodological Review of Mobile Health Services and Applications in India. **International Journal of Medical Informatics**, v. 145, p. 104330, 1 jan. 2021.
- PALMA, D. et al. Dolomitic limestone as an alkalizing agent for treating cassava starch wastewater in an anaerobic reactor. **Revista Ceres**, v. 65, n. 5, p. 388–394, 1 set. 2018.

- PANDEY, V. C. Scope of fly ash use in agriculture: prospects and challenges. *In: Phytomanagement of Fly Ash*. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 63–101.
- PANICHNUMSIN, P. et al. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 8, p. 1117–1124, ago. 2010.
- PEREIRA, E. L. et al. Central composite rotatable design for startup optimization of anaerobic sequencing batch reactor treating biodiesel production wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 3, 1 jun. 2019.
- PEREIRA, M. DE O. et al. Growth and formation of bean phytomass (*Vigna unguiculata* L.) fertilized with mineral fertilizer and manipueira. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 2, p. 210–216, 1 fev. 2018.
- PERES, S. et al. Anaerobic Digestion Process for the Production of Biogas from Cassava and Sewage Treatment Plant Sludge in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 1, p. 150–157, 5 mar. 2019.
- PINGMUANGLEK, P.; JAKRAWATANA, N.; GHEEWALA, S. H. Supply chain analysis for cassava starch production: Cleaner production opportunities and benefits. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1075–1084, 2017.
- PONCE, T.; RIBEIRO, M.; TELLES, T. Dinâmica espacial da produção de mandioca no Paraná, Brasil. *Confins. Revista franco-brasileira de geografia*, n. 48, 2020.
- POKU, A. G.; BIRNER, R.; GUPTA, S. Is Africa ready to develop a competitive bioeconomy? The case of the cassava value web in Ghana. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 134–147, 1 nov. 2018.
- POSTIGO, M. D. et al. Avaliação da eficiência de fossa séptica de baixo custo desenvolvida para o saneamento rural. **Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia**, v. 14, n. 1, 2017.
- QUESADA, G. M.; BEBER, J. A. C.; MOURA, L. G. V. Necessidades anuais de lenha para a produção agropecuária em **município gaúcho de pequenas propriedades**. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 27, n. 1, p. 53-59, 2019.
- RAJENDRAN, R. et al. Biogas plants efficiency in purifying Indian sago factory waste water with wide C/N ratios: Strategies for process water reuse. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 4, n. 4, p. 348–358, dez. 2011.
- RAJENDRAN, K.; MURTHY, G. S. Techno-economic and life cycle assessments of anaerobic digestion – A review. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 20, 1 jul. 2019.
- RAMOS, J. G. et al. Physiological parameters of corn cultivated under organic fertilization of NPK, yellow water and cassava wastewater. **IRRIGA**, v. 24, n. 2, p. 444–459, 27 jun. 2019.
- RAZA, M. Y.; LIN, B. Decoupling and mitigation potential analysis of CO₂ emissions from Pakistan's transport sector. **Science of the Total Environment**, v. 730, p. 139000, 15 ago. 2020.

- REN, J. et al. Performance and microbial community dynamics in a two-phase anaerobic co-digestion system using cassava dregs and pig manure. **Bioresource Technology**, v. 155, p. 342–351, 2014.
- RIBAS, M. M. F.; BARANA, A. C. Processo de partida de um biodigestor do tipo plug-flow para tratamento da manipueira. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 2, p. 223–229, 1 abr. 2003.
- SALLA, D. A. et al. Energetic analysis of the ethanol production systems of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 444–448, 2010.
- SÁNCHEZ, A. D.; LA CRUZ DEL RÍO RAMA, M. DE; GARCÍA, J. Á. Bibliometric analysis of publications on wine tourism in the databases Scopus and WoS. **European Research on Management and Business Economics**, v. 23, n. 1, p. 8–15, 2017.
- SÁNCHEZ, A. S. et al. Waste bio-refineries for the cassava starch industry: New trends and review of alternatives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 jun. 2017.
- SANGYOKA, S.; REUNGSANG, A.; MOONAMART, S. Repeated-batch fermentative for bio-hydrogen production from cassava starch manufacturing wastewater. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 10, n. 11, p. 1782–1789, 1 jun. 2007.
- SANTOS, J. O et al. Greenhouse gas inventory of a state water and wastewater utility in Northeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 168-176, 2015.
- SANTOS, M. H. V. DOS et al. Uso da manipueira como fonte de potássio na cultura da alface (*lactuca sativa* L.) cultivada em casa-de-vegetação. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 32, n. 4, p. 729–733, 2010.
- SAWADOGO, M. et al. Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1047–1056, 10 set. 2018.
- SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Manual de Referência para Casas de Farinha - Boas práticas de fabricação**. Maceió, AL. 2006. Disponível em: < http://industriasantacruz.com/wp-content/uploads/2013/09/ManualdeReferenciaSEBRAE_AL.pdf >. Acesso em: 13 nov. 2020.
- SHAHBAZ, M. et al. **Considering the effect of biomass energy consumption on economic growth: Fresh evidence from BRICS region** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier Ltd, , 1 jul. 2016.
- SCHIMIDT, V.C.R. **Desenvolvimento de bandejas biodegradáveis a partir de fécula de mandioca, fibra celulósica e calcário**. 2006. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88318/225816.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > Acesso em: 23 nov. 2020.

- SENAI. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Departamento Regional do Estado do Rio de Janeiro. **Cartilha inventário de emissões de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro**. 2017. 64 p. Disponível em: <<http://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8A5E3A0127015E3EE5A2310EB8>>. Acesso: 12 dez. 2020.
- SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H. Long-term bioethanol system and its implications on GHG emissions: A case study of Thailand. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 11, p. 4920–4928, 1 jun. 2011.
- SRIROTH, K. et al. Cassava Starch Technology: The Thai Experience. **Starch/Staerke**, v. 52, n. 12, p. 439–449, 2000.
- SILLER, H.; WINTER, J. Degradation of cyanide in agroindustrial or industrial wastewater in an acidification reactor or in a single-step methane reactor by bacteria enriched from soil and peels of cassava. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 50, n. 3, p. 384–389, 1998.
- SILVA, J. L., BARBOZA, M. G., CEZAR, V. R. S. **Desempenho do Reator Anaeróbio Horizontal com Chicanas no tratamento da manipueira em fases separadas e estabilização do pH com conchas de sururu**. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.
- SOBRAL, A et al. Composição bromatológica da silagem de dez cultivares de mandioca. In: **Anais do Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação da Embrapa Tabuleiros Costeiros**. Maceió, AL: Embrapa, Tabuleiros Costeiros, 2014. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/111186/1/463.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2020.
- SOUSA E SILVA, A. DE et al. Potentialities of biotechnological recovery of methane, hydrogen and carboxylic acids from agro-industrial wastewaters. **Bioresource Technology Reports**, v. 10, n. February, p. 100406, 2020.
- SOUZA, S. O. et al. Cyanogenic residues: Environmental impacts, complexation with humic substances, and possible application as biofertilizer. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 225, n. 12, 2014.
- SPEIJERS, G. Cyanogenic glycosides. **WHO Food Additives Series**, v. 30, p. 299-337, 1993.
- SRIROTH, K. et al. Cassava Starch Technology: The Thai Experience. **Starch/Staerke**, v. 52, n. 12, p. 439–449, 2000.
- SUVAJITTANONT, W.; CHAIPRASERT, P. Potential of biogas recirculation to enhance biomass accumulation on supporting media. **Bioresource Technology**, v. 88, n. 2, p. 157–162, jun. 2003.
- SZETO, M. D. et al. Top Authors in Dermatology by h-index: A Bibliometric Analysis of 1980-2020. **Journal of the American Academy of Dermatology**, 18 nov. 2020.

TONELLO, T. U. et al. Biohydrogen production in AnSBBR in fed-batch from starch effluent: Influence of organic load. **Engenharia Agricola**, v. 38, n. 5, p. 768–775, 1 set. 2018.

TONGROON, M. et al. Combustion and emission characteristics investigation of diesel-ethanol-biodiesel blended fuels in a compression-ignition engine and benefit analysis. **Fuel**, v. 255, p. 115728, 1 nov. 2019.

TORRES, D. G. B. et al. Hydrogen production and performance of anaerobic fixed-bed reactors using three support arrangements from cassava starch wastewater. **Engenharia Agricola**, v. 37, n. 1, p. 160–172, 2017.

TRAN, T. et al. A comparison of energy use, water use and carbon footprint of cassava starch production in Thailand, Vietnam and Colombia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 100, p. 31–40, 2015.

TREVISAN, L.; BORDIGNON, M. Screening life cycle assessment to compare CO₂ and greenhouse gases emissions of air, road, and rail transport: An exploratory study. **Procedia CIRP**. Elsevier B.V., 1 jan. 2020

TSAI, F. M. et al. Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 124132, 2020.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VIANA, L. Á.; DÜSMAN, E.; VICENTINI, V. E. P. Mutagenicity and cytotoxicity of liquid waste, press water and pond water, produced in the cassava flour industry, and of antitoxic sodium thiosulfate. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 3, p. 453–458, fev. 2014.

VIDAL, A. P.; LOZADA, P. T.; LEAL, J. S. Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. optimización de variables ambientales y operacionales. **DYNA (Colombia)**, v. 76, n. 160, p. 140–148, 2009.

VIEIRA, E. A. et al. New cassava cultivars for starch and flour production in the Cerrado of Central Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 2, 2020.

VILELA, L. M. B.; MACÊDO, W. V.; AMORIM, E. L. C. Biohydrogen production from cassava wastewater and domestic sewage in an anaerobic fluidized bed reactor. **Latin American Applied Research**, v. 47, n. 1, p. 29–34, 2017.

WANG, K. et al. Reusing a mixture of anaerobic digestion effluent and thin stillage for cassava ethanol production. **Journal of Cleaner Production**, v. 75, p. 57–63, 15 jul. 2014.

WANG, K. et al. Development of a new cleaner production process for cassava ethanol. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 4, p. 493–498, 1 abr. 2017.

WANG, Z.; BUI, Q.; ZHANG, B. The relationship between biomass energy consumption and human development: Empirical evidence from BRICS countries. **Energy**, v. 194, p. 116906, 2020.

WEST, R.; MCILWAINE, A. What do citation counts count for in the field of addiction? An empirical evaluation of citation counts and their link with peer ratings of quality. **Addiction**, v. 97, n. 5, p. 501–504, 2002.

WURSTER, R. Experiences with anaerobic digestion of various cassava residues in Indonesia. **Energy from biomass: 3rd E.C. conference, Venice 1985**, p. 501–505, 1985.

XIE, L. et al. Microbial communities in anaerobic acidification-denitrification and methanogenesis process for cassava stillage treatment. **Applied Mechanics and Materials. Anais...Trans Tech Publications Ltd**, 2014

YEUNG, A. W. K. et al. The ethnopharmacological literature: An analysis of the scientific landscape. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 250, n. November 2019, 2020.

YIN, Y. et al. Strategies of energy management in a cassava starch plant for increasing energy and economic efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1296–1305, 10 out. 2019.

ZAHER, U. et al. Modelling anaerobic digestion acclimatisation to a biodegradable toxicant: Application to cyanide. **Water Science and Technology**, v. 54, n. 4, p. 129–137, 2006.

ZHANG, C. M. et al. Effective ethanol production by reutilizing waste distillate anaerobic digestion effluent in an integrated fermentation process coupled with both ethanol and methane fermentations. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 33, n. 9, p. 1067–1075, nov. 2010.

ZHANG, M. et al. Biorefinery approach for cassava-based industrial wastes: Current status and opportunities. **Bioresource Technology**. Elsevier Ltd, , 1 set. 2016.

ZHENG, P. et al. Biotreatment of cassava-process wastewater using UASB. **Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica**, v. 23, n. 6, p. 774–777, dez. 2002.

ZONG, W. et al. Efficient hydrogen gas production from cassava and food waste by a two-step process of dark fermentation and photo-fermentation. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 10, p. 1458–1463, out. 2009.