UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia - PPGCASA

DANIEL GABALDI POZZETTI

Proposta conceitual de um modal para geração de energia sustentável a partir de resíduos de mandioca (Manihot esculenta Crantz) e Pescado no Amazonas

MANAUS – AM
2025

DANIEL GABALDI POZZETTI

Proposta conceitual de um modal para geração de energia sustentável a partir de resíduos de mandioca (Manihot esculenta Crantz) e Pescado no Amazonas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, na linha de pesquisa Biotecnologia e Sustentabilidade.

Orientador: Anderson Mathias Pereira. Pr. Dr.
Co-orientador: João Paulo Ferreira Rufino Pr. Dr.

MANAUS –AM
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

P893p Pozzetti, Daniel Gabaldi

Proposta conceitual de um modal para geração de energia sustentável a partir de resíduos de mandioca (Manihot esculenta Crantz) e Pescado no Amazonas / Daniel Gabaldi Pozzetti. - 2025.

55 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Anderson Mathias Pereira.

Coorientador(a): João Paulo Ferreira Rufino.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, Manaus, 2025.

1. Bioenergia. 2. Biodigestor. 3. Energia Renovável. 4. Biogás. 5. Biometano. I. Pereira, Anderson Mathias. II. Rufino, João Paulo Ferreira. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia. IV. Título

---

DANIEL GABALDI POZZETTI

Proposta conceitual de um modal para geração de energia sustentável a partir de resíduos de mandioca (Manihot esculenta Crantz) e Pescado no Amazonas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, na área de concentração Biotecnologia e Sustentabilidade.

Aprovada em: 20 /01/2025

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Anderson Mathias Pereira
Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Presidente

_____

Profa. Dra. Simone Braga Carneiro
Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Membro

_____

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Rufino
Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Membro

_____

Prof. Dr. Carlos Augusto da Silva
Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Membro

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estados, área, produção e produtividade da mandioca - 2019/2020..... 20
Tabela 2. Área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras permanentes (2021)..... 21
Tabela 3. Maiores produtores de pescado do Amazonas..... 34
Tabela 4. Maiores produtores de mandioca do Amazonas..... 35
Tabela 5. Maiores produtores de pescado e de mandioca no Amazonas 45
Tabela 6. Quantidade estimada de resíduos produzidos (pescado e mandioca) nos municípios do recorte do estudo..... 46
Tabela 7. Estimativas de produção de biogás nos municípios do recorte de estudo..... 47
Tabela 8. Produção estimada de biometano nos municípios do recorte de estudo..... 47
Tabela 9. Estimativa de energia produzida por tipo de produto nos municípios do recorte de estudo..... 48
Tabela 10. Estimativa da quantidade total de energia produzida na digestão anaeróbia e número de residências que podem ser atendidas nas localidades do recorte de análise..... 49
Tabela 11. Estimativa da produção de biogás e biometano no processo de co-digestão de resíduos do pescado e da mandioca nas localidades do recorte do estudo..... 50
Tabela 12. Estimativa da produção de energia elétrica a partir da co-digestão de resíduos e quantidade de residências que podem ser atendidas..... 50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cadeia agroindustrial da mandioca..... 18
Figura 2. Produção de mandioca no brasil em 2021 (ton.)..... 21
Figura 3. Produção de pescado por espécime cultivado no Brasil..... 24
Figura 4. Produção de peixes de cultivo (criação em cativeiro) por região do Brasil..... 25
Figura 5. Esquema geral do processo de digestão anaeróbia..... 30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Beneficiários e áreas assistidas na produção de farinha de mandioca (2022)..... 24
Quadro 2. Beneficiários assistidos em aquicultura e pesca no amazonas (2022)..... 26
Quadro 3. Produtores envolvidos na piscicultura no Amazonas (2022)..... 26
Quadro 4. Produção de peixes de cultivo no Brasil (ton.)..... 26
Quadro 5. *Ranking* dos municípios maiores produtores de pescado no Amazonas (2021)..... 27

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO..... 09
2. JUSTIFICATIVA..... 11
3. CONTEXTUALIZAÇÃO..... 13
4. OBJETIVOS..... 17
4.1. Objetivo Geral..... 17
4.2. Objetivos Específicos..... 17
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 18
5.1. O CULTIVO DA MANDIOCA (*Manihot esculenta Crantz*): CENÁRIOS..... 18
5.2. PISCICULTURA NO BRASIL E NA AMAZÔNIA..... 24
5.3. ENERGIAS RENOVÁVEIS..... 27
5.4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA RENOVÁVEL..... 28
5.4.1. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DO BIOGÁS..... 29
5.4.1.1. Hidrólise..... 30
5.4.1.2. Acidogênese..... 30
5.4.1.3. Acetogênese..... 31
5.4.1.4. Metanogênese..... 32
5.4.1.5. Purificação..... 33
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... 34
6.1. LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO MUNICIPAL..... 34
6.1.1. Produção de pescado..... 34
6.1.2. Produção de mandioca 35
6.2. RENDIMENTO DE RESÍDUOS..... 35
6.2.1. Rendimento de resíduos do pescado..... 35
6.2.2. Rendimento de efluentes da mandioca..... 36
6.2.3. Produção de biogás e biometano..... 36
6.2.3.1. Biogás e biometano do pescado..... 37
6.2.3.2. Biogás e biometano da mandioca..... 37
6.3. PRODUÇÃO DE ENERGIA..... 38
6.3.1. Energia elétrica gerada pelo biometano derivado do pescado..... 38
6.3.2. Energia elétrica gerada a partir do biometano derivado da mandioca..... 38
6.3.3. Energia elétrica total e residências atendidas..... 39
6.4. CO-DIGESTÃO DO PESCADO E DA MANDIOCA..... 39
6.4.1. Biometano da co-digestão..... 40
6.4.2. Energia elétrica gerada pela co-digestão..... 40
6.5. ANÁLISE DE VIABILIDADE..... 41
6.5.1. CAPEX..... 41
6.5.2. OPEX..... 42
6.5.3. Fluxo de Caixa..... 42
6.5.4. VPL..... 43
6.5.5. TIR..... 44
6.5.6. Payback..... 44
7. RESULTADOS PARCIAIS 45
7.1. PRODUÇÃO MUNICIPAL 45
7.2. RENDIMENTO DE RESÍDUOS..... 46
7.3. PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO..... 46
7.3.1. Produção de Biogás..... 46
7.3.2. Produção de Biometano..... 47

7.4. PRODUÇÃO DE ENERGIA 48
7.4.1 Energia elétrica por produto..... 48
7.4.2. Produção Total de Energia..... 48
7.5. CO-DIGESTÃO DO PESCADO E DA MANDIOCA..... 49
7.5.1. Produção de biogás e biometano..... 49
7.5.2. Produção de energia por meio da co-digestão..... 50

REFERÊNCIAS 51

1. INTRODUÇÃO

O planeta passa atualmente por um processo de transição, principalmente no que diz respeito à produção de energia. No século 21, o que se observa é uma premente necessidade de mudanças baseadas na busca de fontes energéticas alternativas em face da crise ambiental, a qual coloca em evidência a necessidade de se buscar a sustentabilidade das atividades humanas. No setor energético, observa-se um aumento das importações de gás natural (GNL) enquanto que, na outra ponta, há uma significativa redução do fornecimento de petróleo nos mercados mundiais, situações que marcam a atual crise energética. Além disso, destaca-se a crise geopolítica na Ucrânia, bem como um aumento da demanda por energia elétrica dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Nesse cenário, o biogás surge como uma alternativa de geração de energia limpa para que os países possam se desenvolver e produzir (SI *et al*., 2022).

Historicamente, esta mudança na matriz energética global, através de fontes alternativas, traduz uma revisão de conceitos e ideias acerca das relações entre o homem e o meio ambiente que se firmou especialmente no início dos anos 70 do século XX. O progresso científico e tecnológico, inicialmente visto como solução para a pobreza e melhoria da qualidade de vida, revelou-se insuficiente, dando origem a novos desafios. Neste cenário, diversas conferências internacionais resultaram em alertas e compromissos para reduzir emissões poluentes e outras formas de degradação ambiental, como o 2º Relatório do Clube de Roma, de 1974 e o Relatório Brundtland, de 1987, que destacou a necessidade de mudança nos padrões de produção e consumo em prol do desenvolvimento sustentável.

Neste contexto, o biogás ganhou destaque como alternativa para a geração de energia renovável e limpa no Brasil, uma fonte energética que já estava na pauta dos incentivos governamentais para uso de energia de fontes renováveis desde o início dos anos 80, quando o Governo Federal lançou o Programa de Mobilização Energética (PME) por intermédio do Decreto n° 87.079/82 (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

A produção de biogás ocorre a partir da digestão anaeróbia relacionada à ação de organismos microbianos, como as bactérias, transformando a matéria orgânica complexa em compostos simples, como o metano e o dióxido de carbono. Concomitantemente, há a liberação de amônia, de fosfatos e de sulfeto de hidrogênio (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

De forma simples, a digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e a metanogênese. As características do biogás dependem das

condições adequadas de temperatura, pressão, do teor de metano obtido e da proporção de outros gases ou ácidos presentes no substrato final do processo.

Neste processo de biodigestão anaeróbia por sistemas microbianos podem envolver a utilização de resíduos da agroindústria, como a mandioca, bem como aqueles gerados no setor pesqueiro, facilitando o tratamento destes resíduos orgânicos e gerando biogás. O gás metano gerado na digestão anaeróbia pode ser usado na geração de energia em várias escalas, desde as pequenas famílias rurais até as usinas de biogás, constituindo uma fonte energética limpa e renovável que se adequa ao propósito da sustentabilidade, constituindo nesse sentido uma alternativa para a constituição de uma matriz energética brasileira de menor impacto ambiental.

Face ao exposto, a presente dissertação tem como objetivo realizar um estudo da viabilidade econômica da produção de biogás, a partir dos resíduos da mandioca (*Manihot Esculenta Crantz*) e de resíduos de pescado no Estado do Amazonas.

2. JUSTIFICATIVA

As mudanças na matriz energética global, causadas principalmente pela tendência de diminuição de oferta cada vez mais latentes de fontes de energias não renováveis, além dos problemas ambientais associados ao uso destas matrizes energéticas, tem direcionado um maior número de pesquisas acerca de fontes alternativas de energia, como o uso de resíduos da agroindústria e do setor pesqueiro. Dentre estas fontes de energia, está o biogás, uma opção sustentável e que tem como base a geração de energia através da recirculação de nutrientes, viabilizando a mitigação de resíduos orgânicos e efluentes industriais.

Nessas condições, o reaproveitamento de resíduos da mandioca aparece como um excelente substrato para produção de biogás contribuindo para o atendimento das necessidades energéticas da população local, vislumbrando-se a viabilidade da sua utilização em termos de grande disponibilidade de biomassa, uma vez que a mandioca é um dos principais produtos agrícolas cultivados na Amazônia por ser parte essencial da base alimentar da população. Grande parte da produção advém de famílias rurais, gerando alta quantidade de resíduo devido ao consumo diário de uma variedade de alimentos que têm por base esse cultivo agrícola.

A produção de biogás a partir de resíduos de peixe também tem sido tema de pesquisa nos últimos anos. No cenário atual, o Brasil é um dos países com maior potencial de produção e a Amazônia, apesar de não o maior beneficiador de pescado, possui produção significativa de 21.300 toneladas no ano de 2022 (IBGE, 2022). Estes dados mostram a relevância de pesquisas acerca do uso do resíduo de pescado na região.

Nesse contexto, e dadas as peculiaridades da produção agrícola e pesqueira brasileira que se caracteriza pela diversificação dos espécimes cultivados, há um enorme potencial para a exploração destes resíduos visando a produção de material com potencial energético, dentre os quais toma-se como referência para esta pesquisa o aproveitamento da mandioca e resíduos de pescado, produtos de grande presença na economia amazônica.

Considerou-se ainda que, por se tratar de uma fonte de energia renovável, há um potencial significativo de contribuição para atender aos objetivos da sustentabilidade ambiental, no contexto da sua interrelação com outros propósitos igualmente importantes, como a melhoria da qualidade de vida, a inclusão social e produtiva e a redução das externalidades ambientais negativas decorrentes da produção de energia através de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis.

Neste sentido, nesta pesquisa de Mestrado são estudados pontos importantes para

analisar a viabilidade econômica da biodigestão anaeróbia de resíduos da mandioca e de pescado para a produção de biogás.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

As mudanças na matriz energética global, através da adoção crescente de fontes alternativas, traduzem uma revisão de conceitos e ideias acerca das relações entre o homem e o meio ambiente que se firmou especialmente no início dos anos 70 do século XX. Percebeu-se, ao contrário do que se imaginava, que o progresso científico e tecnológico não estava conseguindo reverter a situação de pobreza e nem conduzir a uma melhoria da qualidade de vida a nível mundial. Pelo contrário, novos e graves problemas surgiram paralelamente à evolução do conhecimento e sua aplicação em diferentes áreas da vida humana. Essas questões ganharam destaque com a publicação em 1974 do 2º Relatório do Clube de Roma, criado em 1968, para debater a crise social e ambiental em todo o planeta, tendo como pano de fundo os limites do crescimento. A análise feita por industriais, cientistas e tecnocratas apontava para uma possível catástrofe global, decorrente da expansão da industrialização e esgotamento dos recursos naturais não renováveis em face de uma explosão demográfica e consequente aumento do consumo planetário (MAIA; LEITE, 2022).

O conceito de sustentabilidade se firmou mundialmente a partir do Relatório Brundtland, publicado pela Comissão Mundial das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – WCED – em outubro de 1987[1], documento que colocava em destaque a necessidade de uma mudança nos paradigmas de produção e consumo, sintetizados na ideia da busca do desenvolvimento sustentável (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Firmou-se assim um consenso global acerca de uma relação mais equilibrada entre a sociedade, a economia e o meio ambiente, como base para uma política global apta a viabilizar as propostas de mudanças no modelo econômico visando assegurar a preservação dos recursos naturais para o usufruto das gerações futuras (MAIA; LEITE, 2022).

Desde então, diversas conferências internacionais foram realizadas para debater a questão, resultando no compromisso firmado por um grande número de países em diminuir a quantidade de emissões poluentes em suas várias formas (poluição atmosférica e dos corpos hídricos; geração de resíduos, principalmente derivados de petróleo, poluição sonora, entre outras externalidades ambientais negativas) (MAIA; LEITE, 2022).

Com base nessas observações, pode-se concluir que o conceito de desenvolvimento sustentável expressa à ideia de que a produção de bens e serviços deve crescer paralelamente

[1] A Assembleia das Nações Unidas requisitou à Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, presidida pela Primeira Ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, um relatório sobre a situação ambiental no planeta em 1983, no qual pela primeira vez foi abordada a ideia do desenvolvimento sustentável.

à manutenção do equilíbrio ecológico e da igualdade social. Ou seja, não se pode visar apenas aumento da produção para atender ao mercado, mas determinar como oferecer mais produtos e, ao mesmo tempo, preservar a qualidade ambiental em benefício de toda a sociedade.

Na visão econômica do desenvolvimento sustentável, não basta a criação de novas tecnologias permitindo expandir a produção com o uso do mesmo nível de recursos naturais. É preciso que isso seja feito de maneira a oferecer bem-estar social (qualidade de vida, empregos), sem afetar os estoques de recursos naturais. Assim, a necessidade de conciliar desenvolvimento econômico e preservação ambiental, duas questões que antes eram tratadas separadamente, levaram à formação do conceito de desenvolvimento sustentável.

Mais recentemente, a ONU divulgou em 2015 os ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) que servem como referências para a implantação de políticas e estratégias internas nos países membros visando a busca do desenvolvimento sustentável. O Comitê dessa organização definiu 17 metas a serem alcançadas até 2030, pertinentes à erradicação da pobreza, fome zero, agricultura sustentável, educação de qualidade, equidade e redução das desigualdades, consumo e produção responsáveis, energia limpa, água potável e saneamento básico, cidades e comunidades sustentáveis, saúde e bem-estar, entre outros temas ambientais (MAIA; LEITE, 2022).

Como se observa, a preocupação mundial com a questão ambiental emergiu e consolidou-se na esteira dos impactos gerados pelo desenvolvimento humano, considerado no sentido do aumento do volume de produção e no consumo mundial e seus impactos sobre os recursos naturais não renováveis, progressivamente exauridos, tendo também forte repercussão na qualidade de vida das pessoas.

Um dos fatores associados a essa crise ambiental é a produção de energia, indispensável para manter o modelo de produção vigente, mas cuja utilização também resulta em externalidades ambientais negativas, o que motivou o desenvolvimento de um amplo debate sobre a necessidade de revisão das políticas energéticas baseadas no emprego de recursos não renováveis e/ou altamente poluentes.

Neste contexto, o biogás ganhou destaque como alternativa para a geração de energia renovável e limpa no Brasil, uma fonte energética que já estava na pauta dos incentivos governamentais para uso de energia de fontes renováveis desde o início dos anos 80, quando o Governo Federal lançou o Programa de Mobilização Energética (PME) por intermédio do Decreto n° 87.079/82 (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

Como explicam Milanez, Maia e Guimarães (2021), teve início uma política de incentivo para que as famílias de zonas rurais pudessem criar suínos, bovinos e frangos, entre

outros, visando estimular a produção de biogás a partir da instalação de biodigestores. Todavia, havia carência de conhecimento técnico, além de recursos tecnológicos compatíveis, o que inviabilizou a consolidação desse modelo alternativo de produção energética.

Nos anos 90 o biogás voltou a ganhar destaque nas estratégias de revisão da matriz energética nacional diante da ampliação do debate internacional sobre as questões ambientais. No plano internacional, destaca-se a realização da Conferência de Johannesburg, África do Sul, também conhecida como Conferência Ambiental Rio+10, dando continuidade aos debates iniciados na Eco-92. Nessa nova rodada de discussões, iniciada em 2002, os temas tratados foram sobre as ações para a erradicação da pobreza, os efeitos da globalização e as questões energéticas, com destaque para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021), além das metas fixadas no Protocolo de Kyoto[2], assinado em 1997, prevendo uma redução de emissões poluentes anuais na União Europeia, Estados Unidos e Japão, considerados os maiores emissores de gases de efeito estufa.[3]

No Brasil, o Governo Federal implementou o Decreto n° 11.628/2023, dispondo sobre o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos, visando assegurar o desenvolvimento social e econômico das comunidades que vivem na Amazônia Legal, tendo em vista o grande número de propriedades rurais e comunidades isoladas sem acesso à energia elétrica, fundamental para melhorar a qualidade de vida dessas populações atendendo a diferentes necessidades (educacionais, de comunicação e de inclusão produtiva e social) (BRASIL, 2023).

Esse Programa apresenta como objetivos, dentre outros, nos termos do artigo 2º, a democratização do acesso e uso de energia elétrica à população rural prioritariamente em regiões remotas da Amazônia Legal, além da promoção da sustentabilidade e continuidade na distribuição de energia elétrica, bem como reduzir as desigualdades regionais e sociais com a inclusão das populações vulneráveis através do combate à pobreza energética.

A base de geração de energia através dos biodigestores, considerados alternativa para redução da emissão de gases do efeito estufa, é a digestão anaeróbica, um processo importante para recirculação de nutrientes e para a produção de energia renovável, viabilizando a mitigação da emissão de resíduos orgânicos e efluentes agroindustriais (FEIZ *et al.* 2020).

---

[2] A Conferência de Kyoto, no Japão, foi um evento realizado em 1997 tendo por foco as mudanças climáticas no planeta. Nessa ocasião, os países membros da Convenção sobre Mudanças Climáticas (CMC) assinaram o Protocolo de Kyoto. Este documento previa a criação de leis nos países membros para controle das emissões poluentes e estabelecia metas de redução e combate ao aquecimento global.

[3] O aumento da temperatura do planeta é ocasionado pela acumulação na atmosfera de gases como o dióxido de carbono, metano, óxido de azoto e os CFCs, provenientes do uso de combustíveis fósseis e processos industriais. Este aumento da temperatura é conhecido como efeito estufa.

Esse processo envolve a síntese de matérias orgânicas, resultando na produção do gás metano e de outros materiais gasosos. A quantidade de metano obtida define o potencial energético do processo, levando-se em conta perdas e a proporção de gases inertes gerados (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

Atualmente, algumas pesquisas são direcionadas para a produção de biogás a partir de resíduos da mandioca e do pescado no Brasil. Em estudo de produção de biogás utilizando manipueira, Monteiro *et al*. (2021)., por exemplo, observaram que houve produção de gás com quantidades significativas de metano (em torno de 50%). Os autores enfatizaram que o resíduo apresenta potenciais características como matéria-prima para este tipo de tratamento.

Observa-se que o mercado agroindustrial carece de tratamento adequado para os efluentes residuais da mandioca, o que sugere a oportunidade e a viabilidade do reaproveitamento desse material para a produção de energia elétrica, dando-se uma destinação ambiental adequada ao que seria descartado em um primeiro momento (ACHI; HASSANEIN; LANSING, 2020).

Levando-se em conta essas questões, esse trabalho tem como foco a possibilidade de geração de energia elétrica por intermédio da utilização dos resíduos da mandioca (cascas), depois de tratadas de forma adequada, considerando-se que é um ótimo material orgânico para a produção de biometano (KOHMUEAN, 2020), com grande potencial para atender ao consumo energético de famílias e áreas não integradas à rede convencional de energia elétrica na Amazônia.

Nesse sentido, a produção de literatura sobre o tema revela que a casca da mandioca, bem como a sua fibra, são resíduos que possuem um grande valor agregado com alto potencial para a produção de metano, uma vez essa biomassa é facilmente disponível em propriedades rurais. O seu emprego como material para produção de energia atende ao sétimo objetivo de desenvolvimento sustentável da ONU, que trata de assegurar às pessoas o acesso à energia elétrica de forma sustentável (MABECUA, 2021).

A utilização de resíduos da psicultura para digestão anaeróbia e consequente produção de biogás também tem sido proposta por diferentes autores. Isto deve-se, principalmente, à grande quantidade de matéria orgânica biodegradável. Além do Brasil se configurar como um dos países com significativa produção de pescado.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Realizar um estudo da viabilidade econômica da produção de biogás, a partir dos resíduos da mandioca (*Manihot Esculenta Crantz*) e de resíduos de pescado no Estado do Amazonas.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar o levantamento dos dados de produção da mandioca e do pescado no Estado do Amazonas.
- Estimar a produção de biogás e energia elétrica através da digestão anaeróbia.
- Estimar a produção de biogás e energia elétrica através da codigestão anaeróbia.
- Analisar a viabilidade econômica de uma usina de biogás no Estado do Amazonas.

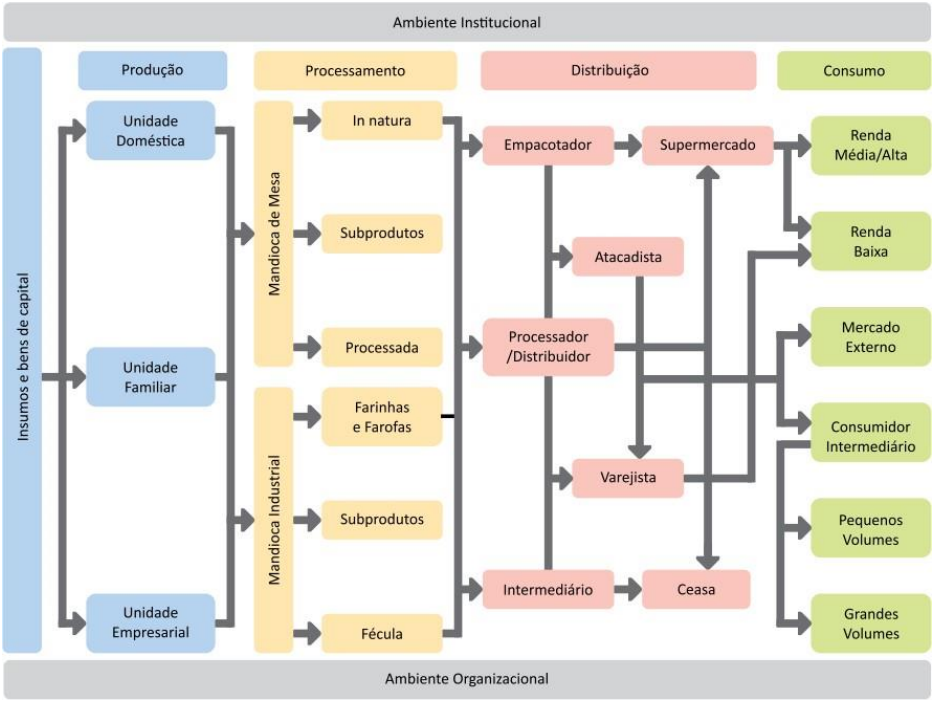
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 O cultivo da mandioca (*Manihot esculenta Crantz*): cenários

A cultura da mandioca é uma das mais antigas que se tem conhecimento na América do Sul. Estima-se que essa cultura exista há cerca de 9 mil anos, pois já era conhecida pelos povos pré-colombianos. Ela é cultivada em mais de 100 países tropicais e subtropicais e pode ser produzida em pequena, média e grande escala. Como alimento, ela se caracteriza como fonte de carboidrato e tem grande importância social, principalmente em famílias de baixa renda, porque dela se obtém grande variedade de pratos.

A mandioca é um alimento rico em amido e é um dos alimentos mais consumidos pela população da Região Norte do Brasil, ficando atrás apenas do arroz e do milho, além de ser uma espécie de grande capacidade de adaptação que se desenvolve em solos pobres. A mandioca pode ser aproveitada de várias maneiras, como a fécula que se deriva diversos tipos de produto. A indústria a aproveita na produção de biscoitos, farinhas, massas, papéis, fermento, colas, tintas,entre outros (Figura 1).

FIGURA 1 - Cadeia agroindustrial da mandioca



Fonte: Adaptado de Cunha (2007)

Durante os anos 1950 e 2019 a produção mundial de mandioca cresceu cerca de 2,3% ao ano, sendo que na África ocorreu um crescimento de 3,3% ao ano e na Ásia, a Tailândia se destaca como um grande produtor com crescimento de 2,3% ao ano, ao passo que a produção

brasileira caiu cerca de 0,4% ao ano, segundo informações da Organização das Nações Unidas. Em 2018, no Brasil, a produção de farinha de mandioca gerou cerca de 4.124 mil empregos diretos (COELHO, 2019).

Segundo dados da Nações Unidas, o Brasil é responsável pela produção de 70% da mandioca na América Latina, atingindo a safra de 2019/2020 a produção de 18,7 milhões de toneladas. A cultura da mandioca, no Brasil, está voltada para a demanda do mercado interno, tendo pouca representatividade no mercado internacional. Neste processo, quando ela é desvalorizada, o Governo Federal adota uma política de preços mínimos.

As raízes de mandioca são consideradas um dos alimentos fundamentais na segurança alimentar da população brasileira, pois é consumida por grande parte da população, principalmente nas Regiões Norte e Nordeste. Na região Norte, ela resulta na alimentação básica da maior parcela da população mais carente: ribeirinhos, índios e grande parcela da classe mais pobre da população. E, sendo de fácil acesso e manuseio, está presente na mesa de todas as classes sociais, nos mais variados tipos de pratos, quer seja frita, cozida, ou em forma de caldos, bolos, salgados, entre outros. Ou seja, a mandioca está presente na mesa de toda a sociedade brasileira. (NEVES *et al*., 2020).

As regiões com maior produção de mandioca, encontram-se na região Norte, com 38%e na região Nordeste, com 17,9% da produção Nacional, destacando que nessas regiões, a maiorparte da produção de mandioca é feita por pequenos agricultores ou pelos agricultores vinculados ao sistema de Agricultura família (SICAR). Infelizmente devido à falta de tecnologias acessíveis a produção é diretamente afetada, limitando o potencial do cultivo da mandioca e o seu desenvolvimento (DERAL, 2022).

Na maior parte das agroindústrias é notável a carência de inovações tecnológicas, o que afeta diretamente a cadeia produtiva. A precariedade também se encontra na forma de como a mandioca é comercializada no mercado interno brasileiro. É preciso destacar que a mandioca libera resíduos poluentes ao meio ambiente. Isso demonstra que o reaproveitamento desses resíduos na geração de biogás é uma forma de mitigar impactos ambientes que poderiam possivelmente afetar o meio ambiente, resultando em uma reutilização de 80% de resíduos oriundos da mandioca que deixariam de ser inseridos no meio ambiente (ANDRADE, 2022). A Tabela 1 apresenta os dados relativos aos principais Estados, área, produção e produtividade da mandioca cultivada no Brasil.

TABELA 1 - Estados, área, produção e produtividade da mandioca - 2019/2020

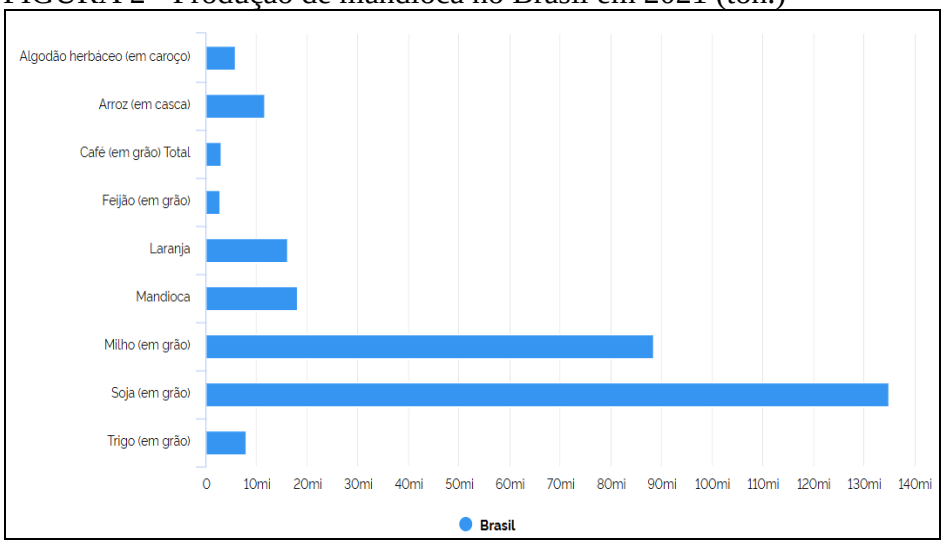
REGIÕES/ESTADOS	Área (1000 t)	Prod. (1000 t)	Produtividade (kg/ha)	Participação (%)
Norte	**507**	**7.150**	**14.103**	**38,3**
Pará	278	3.829	13.773	20,5
Amazonas	135	1.24	9.185	6,6
Acre	35	1.001	28.6	5,4
Outros	59	1.080	18.305	5,8
Nordeste	**427**	**3.342**	**7.827**	**17,9**
Bahia	133	963	7.241	5,2
Maranhão	53	411	7.755	2,2
Ceará	59	451	7.644	2,4
Outros	182	1.517	8.335	8,1
Sul	**216**	**4.527**	**20.958**	**24,2**
Paraná	140	3.321	23.722	17,8
Rio G. do Sul	57	842	14.772	4,5
Santa Catarina	19	364	19.558	1,9
Sudeste	**139**	**2.217**	**15.950**	**11,9**
São Paulo	80	1.394	17.425	7,5
Minas Gerais	39	547	14.026	2,9
Outros	20	276	13.8	1,5
Centro Oeste	**75**	**1.437**	**19.160**	**7,7**
Mato G. do Sul	45	972	21.600	5,2
Mato Grosso	18	274	15.222	1,5
Outros	12	191	15.917	1,0
Brasil	**1.364**	**18.673**	**13,690**	**100**

Fonte: IBGE (2022).

Como mostra a Tabela 1, o maior produtor de mandioca na Região Norte é o estado do Pará, seguido do Amazonas, cujo registro é precário em relação aos produtores advindos da agricultura familiar, que comercializam nas comunidades de baixa expressão e pouco assistidas pelas relações comerciais. Esse cenário fundamenta o desenvolvimento desta pesquisa, considerando-se que a geração de biogás através dos resíduos da mandioca atenderia parte da demanda de energia elétrica dessas comunidades, enquanto não se tem uma geração e distribuição de energia através da rede convencional para atender a essas famílias de baixa renda.

Segundo os dados do IBGE (2022), a mandioca é o terceiro produto mais cultivado no Brasil (Figura 2), sendo que os resíduos gerados por essa cultura representam, nesse cenário, uma potencialidade no que tange à possibilidade de reaproveitamento como forma de mitigar os impactos ambientais decorrentes do uso de recursos não renováveis como fonte energética.

FIGURA 2 - Produção de mandioca no Brasil em 2021 (ton.)



Fonte: IBGE (2022)

Os dados relacionados ao cultivo da mandioca no Amazonas revelam áreas de cultivo presentes em todos os municípios do Estado, porém existem peculiaridades com relação às áreas plantadas, quantidade produzida e rendimento por hectare (Tabela 2).

TABELA 2 – Área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras permanentes (2021).

Produto das lavouras permanentes – Total			
UF, Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso e Micro, e nome de Município - AM	**Variável**		
	Área destinada a colheita (Hectares)	**Área colhida (Hectares)**	**Valor da produção (Mil Reais)**
Amazonas	**21850**	**20769**	**424551**
Norte Amazonense	**354**	**284**	**8080**
Rio Negro	259	191	6145
Barcelos	58	41	1518
Novo Airão	41	41	690
Santa Isabel do Rio Negro	41	33	1373
São Gabriel da Cachoeira	119	76	2564
Japurá	95	93	1936
Japurá	66	64	1110
Maraã	29	29	827
Sudoeste Amazonense	1884	1517	40558
Alto Solimões	1005	674	19107
Amaturá	56	50	1301
Atalaia do Norte	145	114	6890

Benjamin Constant	392	122	3032
Fonte Boa	133	114	1038
Jutaí	157	154	1411
Santo Antônio do Içá	...	...	...
São Paulo de Olivença	59	59	3601
Tabatinga	45	43	1232
Tonantins	18	18	605
Juruá	879	843	21454
Carauari	221	212	3625
Eirunepé	279	279	5492
Envira	278	263	10813
Guajará	15	12	357
Ipixuna	34	34	398
Itamarati	44	35	622
Juruá	8	8	147
Centro Amazonense	14919	14537	292606
Tefé	350	334	4940
Alvarães	92	89	1415
Tefé	221	212	2925
Uarini	37	33	600
Coari	5051	4988	116860
Anamã	130	121	3140
Anori	93	81	1751
Beruri	15	15	199
Caapiranga	120	85	1538
Coari	413	409	4116
Codajás	4280	4277	106117
Manaus	2618	2375	86104
Autazes	334	288	7002
Careiro	344	317	8531
Careiro da Várzea	201	185	6016
Iranduba	318	318	7154
Manacapuru	1038	884	45654
Manaquiri	215	215	8506
Manaus	168	168	3245
Rio Preto da Eva	1918	1918	34185

Presidente Figueiredo	1233	1233	12094
Rio Preto da Eva	685	685	22091
Itacoatiara	1333	1313	27058
Itacoatiara	729	729	17791
Itapiranga	107	87	1293
Nova Olinda do Norte	237	237	3128
Silves	71	71	2034
Urucurituba	189	189	2813
Parintins	3649	3609	23462
Barreirinha	113	108	1162
Boa Vista do Ramos	115	105	1693
Maués	2391	2391	8386
Nhamundá	26	21	534
Parintins	261	241	3890
São Sebastião do Uatumã	107	107	1940
Urucará	636	636	5860
Sul Amazonense	4693	4431	83307
Boca do Acre	604	595	7698
Boca do Acre	427	426	4719
Pauini	177	169	2979
Purus	519	514	10213
Canutama	15	15	475
Lábrea	250	250	4413
Tapauá	254	249	5325
Madeira	3570	3322	65397
Apuí	418	414	3325
Borba	278	278	3001
Humaitá	565	561	12564
Manicoré	1658	1444	32763
Novo Aripuanã	651	625	13745

Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal, 2022.

Apesar do Amazonas não ser autossuficiente na produção de farinha de mandioca, a participação do estado é de mais de 11,69% da produção na Região Norte. Existem mais de 65 mil agricultores familiares, sendo que os maiores produtores de mandioca são Tefé, Manacapuru e Manicoré. A produção de farinha de mandioca, principal derivado, atingiu 32,8 mil toneladas (Quadro 1).

QUADRO 1 – Beneficiários e áreas assistidas na produção de farinha de mandioca (2022)

Discriminação	Quantidade		
	Nº de beneficiários	Área (ha)	Produção (ton)
Mandioca	9.425	11.338	32.324

Fonte: IDAM – UNIDADES LOCAIS/DEPLA

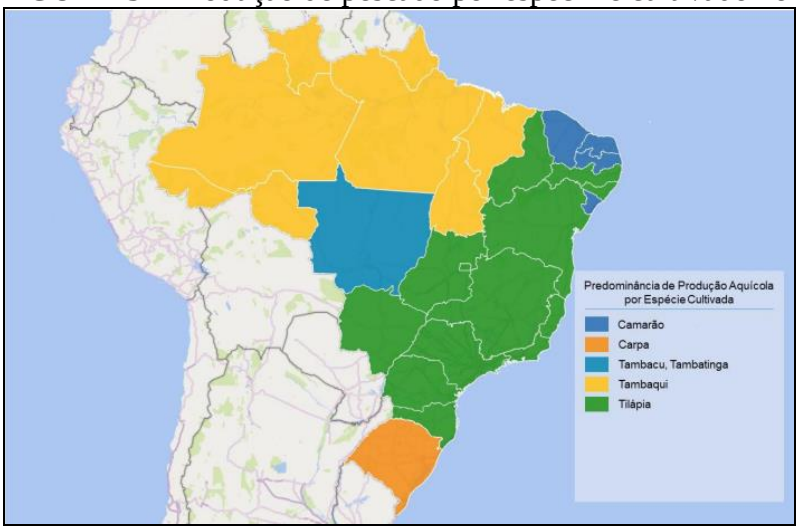
Assim, vislumbra-se a importância e a urgência no desenvolvimento de pesquisas que se debrucem na busca de soluções que possam incentivar o desenvolvimento das pequenas comunidades amazonenses, sendo a mandioca e seus derivados, inclusive os resíduos, uma grande potencialidade como demonstram os dados sobre seu cultivo. Para além do Amazonas, entende-se que o estudo contribui para considerar a viabilidade dessa fonte energética em outras partes do território brasileiro, seja do ponto de vista de reaproveitamento ou da sustentabilidade ambiental.

5.2 PISCICULTURA NO BRASIL E NA AMAZÔNIA

No cenário atual, o Brasil é um dos países com maior potencial de produção para atender à crescente demanda mundial por pescado até 2030. A tendência é um aumento significativo no volume de pescado produzido utilizando-se os vastos recursos hídricos do país. Dados fornecidos pelo IBGE sobre a aquicultura em águas interiores revelam uma produção de 629 mil toneladas de pescado em 2021 (um aumento de 2,61% em relação ao ano de 2019 (CONAB, 2022).

Com relação aos espécimes cultivados, há uma diversificação por região do país, como mostra a Figura 3.

FIGURA 3 – Produção de pescado por espécime cultivado no Brasil



Fonte: CONAB, 2022.

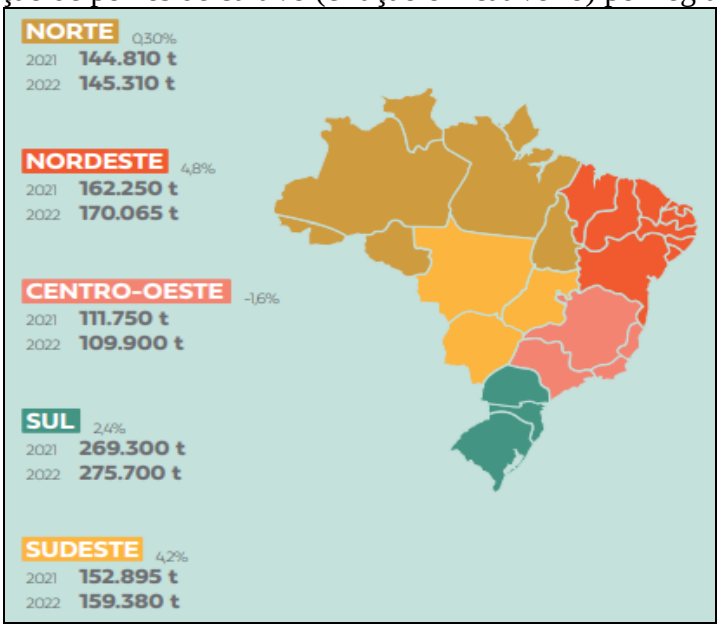
No âmbito da economia mundial, segundo a FAO, o Brasil ocupava, em 2019, a 32ª posição entre os maiores produtores mundiais de pescado, vindo em primeiro lugar a China (15%), seguida pela Indonésia (7%), Peru (7%), Índia (6%), Rússia (5%), Estados Unidos (5%) e Vietnã (3%) (CONAB, 2022).

O Ministério da Pesca e Aquicultura (BRASIL, 2023) classifica a atividade pesqueira como artesanal, industrial ou amadora. Segundo essa fonte, o Brasil produz cerca de 1.240.000 toneladas de pescado por ano, sendo que cerca de 45% dessa produção é oriunda da pesca artesanal. Contudo, há um problema referente a esta atividade que está na forma de destinação dos resíduos pesqueiros, pois estes possuem alta carga de matéria orgânica, que se mal gerenciados podem afetar as características do solo e dos recursos hídricos.

Na Amazônia, esse gerenciamento racional dos recursos pesqueiros ainda é incipiente, dificultado por diferentes razões. O pescado é comercializado principalmente para atender ao mercado interno, sendo enviado aos principais centros consumidores regionais. O fluxo da produção envolve o pescador, frigoríficos ou intermediários e atacadistas encarregados da distribuição (peixarias, feiras, supermercados). Uma parte da produção amazônica supre grandes redes de supermercados de outras partes do Brasil (São Paulo, Belo Horizonte, Goiânia e Brasília, principalmente).

Embora a criação em cativeiro esteja difundida em todo país, a Amazônia, apesar das condições ideais em termos de clima e disponibilidade de água em abundância, não ocupa o primeiro lugar na produção total de pescado no país (Figura 4).

FIGURA 4 – Produção de peixes de cultivo (criação em cativeiro) por região do Brasil



Fonte: Anuário Brasileiro da Piscicultura, 2023.

A principal espécie comercializada oriunda dos rios amazônicos ou de criadouros (criação em cativeiro) é o tambaqui, predominante nos estados da Região Norte e no Maranhão. Rondônia respondeu por 46,6% do total produzido no Brasil em 2020 (CONAB, 2022).

A psicultura no Estado do Amazonas registra um crescimento passando de 3.060 toneladas em 2021, para 3.326 toneladas em 2022. O Quadro 2 apresenta uma síntese dessa atividade econômica com relação ao número de produtores assistidos, área destinada à piscicultura e produção total (em toneladas) no Estado do Amazonas.

QUADRO 2 – Beneficiários assistidos em aquicultura e pesca no amazonas (2022)

Modalidade	**Nº de criadores**	**Área alagada (ha)**	**Área alagada (m^3)**	**Nº de peixes estocados (mil)**	**Produção (ton)**
Barragem (ha)	109	157	-	417	857
Tanque escavado (ha)	361	330	-	1.599	2.357
Canal de igarapé (m^3)	16	-	3.711	66	92
Tanque rede (m^2)	6	-	478	42	20
Total	492	487	4.189	2.124	3.326

Fonte: IDAM, 2023.

Ainda com relação aos cenários locais para a piscicultura, o Quadro 3 discrimina o total de produtores segundo o tipo de pesca (artesanal ou manejada) e total produzido por cada categoria.

QUADRO 3 – Produtores envolvidos na piscicultura no Amazonas (2022)

Discriminação	**Nº de pescadores / armadores**	**Produção (ton)**
Pesca artesanal	1.437	21.765
Pesca manejada	579	565
TOTAL	2.016	22.330

Fonte: IDAM, 2023.

De acordo com a Associação Brasileira de Psicultura o Amazonas ocupa a posição de 15° no ranking da produção de peixes de cultivo no Brasil (Quadro 4).

QUADRO 4 – Produção de peixes de cultivo no Brasil (ton.)

2020	**2021**	**2022**	**ESTADO**	**2020**	**2021**	**2022**
1º	1º	1º	PR	172.000	188.000	194.100
2º	2º	2º	SP	74.600	81.640	83.400
3º	3º	3º	RO	65.500	59.600	57.200
7º	5º	4º	MG	44.300	49.100	54.700
4º	4º	5º	SC	51.700	53.600	54.300
5º	6º	6º	MA	47.700	46.500	50.300
6º	7º	7º	MT	46.800	42.600	42.800
8º	8º	8º	MS	32.390	37.400	34.450
9º	10º	9º	BA	30.270	31.250	34.000

12º	9º	10º	PE	27.725	31.930	21.960
10º	11º	11º	GO	30.062	29.700	30.500
11º	12º	12º	RS	26.102	27.700	27.300
13º	13º	13º	PA	25.400	24.800	25.120
15º	15º	14º	PI	20.250	22.100	22.900
14º	14º	15º	AM	21.500	21.000	21.300
17º	17º	16º	RO	17.500	18.300	19.200
16º	16º	17º	ES	18.532	18.700	17.900
18º	18º	18º	TO	14.804	16.250	17.350
19º	19º	19º	AL	10.000	12.800	13.100
20º	20º	20º	CE	5.500	6.500	6.860
22º	21º	21º	SE	3.800	4.600	4.100
21º	22º	22º	AC	4.060	3.740	3.860
24º	23º	23º	RN	3.280	3.570	3.700
23º	24º	24º	RJ	3.340	3.455	3.380
25º	25º	25º	PB	3.165	3.000	3.145
26º	26º	26º	DF	2.060	2.050	2.150
27º	27º	27º	AP	1.040	1.120	1.280
TOTAL				**802.930**	**841.005**	**860.355**

Fonte: ANUÁRIO BRASILEIRO DA PISCICULTURA, 2023.

Como evidenciam os dados do QUADRO 4, o estado do Amazonas apresentou em 2022 um crescimento de 1,4% em relação ao ano de 2021. As espécies mais cultivadas são o tambaqui, a pirapitanga, a tambatinga, o pirarucu, o mantrinxã e o piauçu. O Quadro 5 apresenta os municípios que mais produzem pescado no Estado do Amazonas (ranking por toneladas produzidas).

QUADRO 5 – *Ranking* dos municípios maiores produtores de pescado no Amazonas (2021)

Ranking	**Município**
1º	Rio Preto da Eva
2º	Manaus
3º	Iranduba
4º	Manacapuru
5º	Itacoatiara
6º	Coari
7º	Presidente Figueiredo
8º	Careiro
9º	Humaitá
10º	Apuí

Fonte: IBGE – Pesquisa da Pecuária Municipal, 2022.

5.3. ENERGIAS RENOVÁVEIS

Atualmente todos os países estão buscando fontes alternativas de energia. O desafio de um desenvolvimento sustentável na comunidade internacional para combater o aquecimento global é unanimidade nos países que fazem parte do comitê das Nações Unidas

(ONU). Desde o relatório de Brundtland, a convenção do Quadro das Nações Unidas de 1992 (UNFCCC), o Acordo de Paris de 2015, a Agenda Rio+20, entre diversas Convenções Climáticas, vem tratando o assunto com extrema urgência para esse Desafio Global que os países estão enfrentando. Estabeleceram-se metas e objetivos para um mundo sustentável como a redução de emissão e concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera para que se evite que a temperatura do planeta suba 2°C.

Nesse cenário, há um consenso de grande número de nações no sentido de uma política energética comum com a substituição da produção de energia não-renovável por fontes renováveis. A alteração da matriz energética visa combater o aquecimento global decorrente da queima de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo diminuindo e substituindo essas fontes por outras como a energia solar e a energia eólica. Estima-se que em 2016 foram investidos 140 bilhões de dólares em fontes renováveis, enquanto que o valor dos subsídios com uso de combustível fóssil chegou a 260 bilhões de dólares (ESPA *et al.*, 2018).

Há controvérsia com relação ao alcance de uma matriz energética 100% renovável, pois alguns pesquisadores não consideram biomassa, biocombustível e biogás como renováveis, por não serem tecnologias com emissão zero de CO_2 para gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos em seu ciclo de vida. Algumas fontes indicam que para se ter uma matriz energética 100% renovável, as fontes de energia devem ser: energia eólica, energia hidráulica, bioenergia, geotérmica, energia oceânica (marés, ondas, correntes oceânicas, térmica oceânica) (BREYER *et al*, 2022).

A mitigação dos impactos ambientais e as mudanças climáticas tem relação com o sistema de digestão anaeróbica adotado e o ciclo de vida dos gases de efeito estufa, também chamado de potencial de aquecimento global e pegada de carbono. Dependendo do objetivo desejado, os índices de mitigação variam segundo o volume de biometano gerado, devendo ser levado em conta ainda outros indicadores e parâmetros de performance do processo de síntese de materiais orgânicos. Nesse contexto, apesar do uso do biogás produzido em usinas ser de grande utilidade para geração de energia limpa, trata-se de uma fonte energética que não substitui totalmente o uso de combustíveis fósseis (FEIZ *et al.*, 2020).

5.4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA RENOVÁVEL

A produção de biogás é uma alternativa importante para a substituição no uso de combustíveis fósseis. Na Europa, a Alemanha foi pioneira no uso dessa fonte de energia

renovável. Acompanhando essa iniciativa, houve um expressivo crescimento da indústria de biogás em outros países do continente. O volume de biogás produzido depende de algumas variáveis, como o tipo de matéria prima para a inoculação e geração de gás no recipiente escolhido, bem como variedades de bactérias com desempenho ideal para que ocorra a geração de biogás (IGNATOWICZ *et al, 2023*).

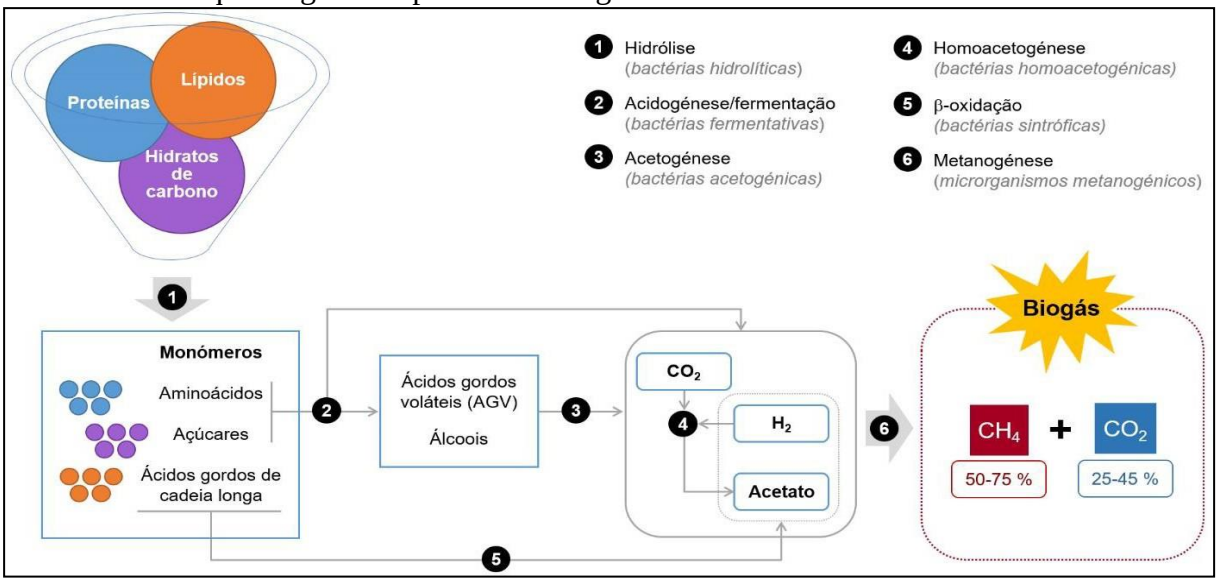
O biogás é um produto derivado de um processo biológico, físico e químico chamado de digestão aeróbica, consistindo principalmente em metano (CH^4), com concentrações que variam entre 50 a 70%, e dióxido de carbono (CO^2), com taxas que variam entre 30 a 50%, mas que podem variar de acordo com a natureza do substrato utilizado e o pH do reator.

Também é composto, minoritariamente, por outros componentes como nitrogênio (N^2), com concentrações entre 0% - 3%, gerado através da saturação do ar do efluente, vapor de água (H2O), com concentrações que variam de 5% - 10%, encontrado em temperaturas termofílicas altas devido à evaporação contida na amostra, concentrações de oxigênio (O_2), que variam entre 0% e 1%, advindo pelo substrato do efluente ou por algum tipo de vazamento no compartimento, sulfeto de hidrogênio (H_2S), com concentrações que variam entre 0 – 10.000 ppmv, resultante da redução de sulfato presente em efluentes, amônia (NH_3), derivado da hidrólise de proteínas materiais ou da urina, hidrocarbonetos com taxa de concentrações entre 0 – 200 mg/m³, resultantes de efluentes industriais da saúde e de cosméticos (ANGELIDAKI *et al.*, 2018).

5.4.1. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DO BIOGÁS

A digestão anaeróbia depende da atividade e ações de microrganismos, a maior parte bactérias, quebrando componentes orgânicos biodegradáveis, transformando o material orgânico em componentes químicos como dióxido de carbono e metano submetidos a condições anaeróbicas. O processo de transformação ocorre em 4 etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e a metanogênese. Para cada etapa, diferentes microrganismos atuam em sintrofia, assim como diferentes condições ambientais (FIGURA 5).

FIGURA 5 - Esquema geral do processo de digestão anaeróbia



Fonte: https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2020/009/

5.4.1.1. Hidrólise

A hidrólise consome compostos de alta massa molecular como lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas simples (monômeros) e solúveis. A bactéria quebra grandes moléculas de compostos orgânicos pesados (carboidratos, gordura e proteína), quando diluído em água e compostos orgânicos solúveis como aminoácidos, ácidos graxos e açucares (MONDEBACH; NOKES, 2013).

Esse processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas. O processo de degradação da hidrólise depende da característica do substrato, ou seja, o tempo de degradação e seu substrato envolvido. Dessa maneira, se o tipo de matéria orgânica for complexo e de difícil degradação, a velocidade de degradação pode variar e limitar a velocidade de digestão anaeróbia. A duração da etapa de hidrólise varia de acordo com as propriedades do substrato, levando poucas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídeos. A lignocelulose e a lignina hidrolisam mais lentamente, muitas vezes de forma incompleta (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

5.4.1.2. Acidogênese

Os monômeros formados na fase hidrolítica são utilizados como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e bactérias arbitrárias. Dessa forma, os substratos passam pela fase chamada acidogênica e ácidos orgânicos de cadeia curta que são moléculas com 1 a 5 carbonos (ex. ácidos butírico, propiônico e acético), álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de

hidrogênio e dióxido de carbono. Ao serem consumidos por acidodógenos, ocorre a produção de ácidos graxos voláteis em forma de ácidos orgânicos de baixa densidade como ácido acético, ácido lático, ácido propiônico e ácido butírico, assim como outros subprodutos como H_2, CO_2 e álcoois de cadeia pequena também conhecidos como acidogênese (JIRAPRASERTWONG; MAITRIWONG; CHAVADEJ, 2018).

Devido à pressão parcial de hidrogênio que afeta de forma direta o processo no estado de oxidação dos produtos que ocorre em alta quantidade, resulta na produção de carbono em maior quantidade.

Na acidogênese, os carboidratos, como glicose, são degradados em piruvato. O produto é convertido em ácido lático por *Lactobacillales* e em etanol pela ação de leveduras. Os ácidos graxos são degradados, pela Acetobacter por β-oxidação. Os ácidos graxos devem estar conectados a coenzima A e a oxidação ocorre passo a passo pela liberação sequencial de duas unidades de carbono, na forma de acetato, enquanto os aminoácidos são degradados em pares pelo *Clostridium Botulinum* através da reação de Stickland, onde um aminoácido serve como doador de elétron e outro como receptor.

5.4.1.3. Acetogênese

A terceira etapa da digestão anaeróbia é crítica ao processo, guiado por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. As reações são endotérmicas, por exemplo, a degradação do ácido propiônico a acetato e dióxido de carbono apresenta $\Delta G = + 74$ kJ.mil^{-1}.

A acetogênese é uma etapa fundamental no processo da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e consequentemente para a geração de biogás. A comunidade microbiana e o envolvimento de vias metabólicas podem fornecer informações para a otimização dos reatores anaeróbios, podendo aumentar a produção de biogás.

As bactérias acetogênicas estabelecem relação de sintrofia com as *arqueas* metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa, os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), com a concomitante produção de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias homoacetogênicas regem o equilíbrio da direção da reação de consumo de hidrogênio e gás carbônico para produção de acetato. Para que a formação de ácidos de cadeia curta seja termodinamicamente favorável, esta deve ocorrer ligada ao consumo de hidrogênio gasoso pelas *arqueas* metanogênicas. A sintrofia entre organismos dos grupos microbianos distintos possibilita que ambos apresentem crescimento, assegurando a viabilidade de produção de acetato a partir de ácidos orgânicos (CHOJNACKA *et al, 2015*).

5.4.1.4. Metanogênese

A metanogênese é a etapa final, ocorrendo em condições estritamente anaeróbias. Deste modo, o carbono contido na biomassa é convertido para dióxido de carbono e metano através da ação das *arqueas* metanogênicas. O domínio *arquea* é polimórfico, para que possa haver evidencia a partir de outros domínios apenas pela sequência de 16 rRNA. Como podemos ver, as reações que ocorrem na metagênese são exotérmicas.

As *arqueas* metanogênicas são divididas de acordo com suas vias metabólicas em acetoclásticas e hidrogenotróficas. As *arqueas* metanogênicas acetoclásticas (*Ex. Methanospirrilum*) convertem acetato a metano e as *arqueas* metanogênicas hidrogênotroficas (Ex. *Methanobacterium* e *Methanospirillum*) convertem hidrogênio e dióxido de carbono a metano, através de reações exotérmicas.

Muitos autores relatam a colaboração de 70/30% na produção de metano entre as arqueas metanogênicas acetoclásticas/hidrogenotróficas. As *arqueas* metanogênicas acetoclásticas possuem maior sensibilidade às mudanças de pH e elevadas concentrações de amônia, caracterizando-se de substratos agropecuários (diferente de esgoto sanitário), esse fato pode implicar no predomínio das *arqueas* metanogênicas hidrogenotróficas. Na ausência das metanogênicas acetoclásticas, o acetato produzido durante a biodigestão é oxidado pelas bactérias homoacetogênicas produzindo CO_2 e H_2, sendo utilizados como substrato pelas *arqueas* metanogênicas hidrogenotróficas, produzindo metano. (ZHANG; LI; LI, 2021).

Para que se produza metano, o processo biológico passa por diversas etapas, convertendo o substrato orgânico em biogás através de microrganismos, as equações de 1 a 5 representam as quatro etapas, respectivamente: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O resultado das ações dos microorganismos acetogênicos são transformados através dos microorganismos metanogênicos para metano. O esquema abaixo sintetiza o processo de geração de metano:

$$CH_3COO^- + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3^- \quad (1)$$

$$HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \quad (2)$$

$$4CH_3OH \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (3)$$

$$4HCOO^- + 2H^+ \longrightarrow CH_4 + CO_2 + 2HCO^-_3 \quad (4)$$

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (5)$$

5.4.1.5. Purificação

O componente de silício orgânico volátil é um dos elementos mais problemáticos presente no biogás, conhecido também como siloxanos que são substâncias químicas que contem silício e átomos de oxigênio e os hidrocarbonetos que ficam ligados com átomos de silício. A necessidade de se purificar o biogás gerado através da digestão anaeróbia é devido a propriedades tóxicas e carcinogênicas presentes em animais, pois o produto da oxidação de metilsiloxanos voláteis possui capacidades mutagênicas e cancerígenas.

Através de métodos de absorção e resfriamento se pode realizar o processo de purificação do biogás e do metilsiloxanos voláteis. O gel de sílica é um adsorvente usado em forma de grânulos de alta porosidade, de estrutura polar e de alta afinidade com a água, ela se tornar um dos dessecantes mais eficazes para remoção dos componentes no processo de purificação (GAJ, 2020).

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, são descritos os procedimentos empregados para o desenvolvimento da pesquisa, delineando-se o percurso realizado com explicitação das técnicas, do método utilizado e a definição dos critérios de coleta e análise dos dados.

6.1. LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO MUNICIPAL

A primeira etapa da pesquisa consistiu em realizar o levantamento da produção amazonense de pescado e de mandioca. Para isso, recorreu-se às pesquisas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Por meio dessa fonte, foi possível obter dados sobre a produção em cada município do Estado.

6.1.1. Produção de pescado

A quantidade de pescado produzida no estado do Amazonas foi determinada através da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) do IBGE, a qual fornece os índices de produção por município, não só do total de pescado, quanto também das espécies produzidas.

A Tabela 3 apresenta a produção de pescado, por tipo de peixe, dos três maiores produtores de pescado do Amazonas, de acordo com a última PPM publicada (PPM, 2022). A tabela completa com a produção dos 62 municípios amazonenses, encontra-se no ANEXO A.

TABELA 3 - Maiores produtores de pescado do Amazonas

Localidade	Matrinxã (*kg*)	Pirarucu (*kg*)	Tambaqui (*kg*)	Todos (*kg*)
Rio Preto da Eva	880.000	0	1.250.000	2.130.000
Manaus	580.000	0	1.100.000	1.680.000
Iranduba	70.000	10.000	1.000.000	1.080.000
AMAZONAS	**2.048.435**	**319.665**	**6.210.108**	**8.614.519**

Fonte: IBGE, 2022.

Os dados acima demonstram que a espécie mais produzida no Amazonas é o tambaqui (*Colossoma macropomum*), indicador importante para validar os dados sobre rendimento de resíduos na próxima etapa. O ANEXO A apresenta mais detalhadamente a produção piscícola comercial do Estado, demonstrando a quantidade produzida de cada uma das diferentes espécies comercializadas, por município.

6.1.2. Produção de mandioca

Para a determinação da quantidade de mandioca produzida no estado do Amazonas, foram utilizados dados fornecidos pelo IBGE sobre a Produção Agrícola Municipal (PAM) compilados em 2022. Na Tabela 4 é apresentada a produção de mandioca dos três maiores produtores do Amazonas. A relação completa da produção em todos os municípios amazonenses encontra-se no ANEXO B.

TABELA 4 - Maiores produtores de mandioca do Amazonas

Localidade	Área Plantada (ha)	Área Colhida (ha)	Quantidade Produzida (ton)
Manacapuru	10.692	10.519	125.787
Tefé	9.076	9.076	90.760
Manicoré	6.000	5.900	76.000
AMAZONAS	**75.034**	**74.714**	**767.634**

Fonte: IBGE, 2022.

6.2. RENDIMENTO DE RESÍDUOS

Realizado o levantamento atualizado dos volumes de produção de pescado e de mandioca no Amazonas, procedeu-se à estimativa da quantidade de resíduos gerados com essas quantidades produzidas. Tomou-se como referência o relatório técnico da CIbiogás (INSTITUTO ESCOLHAS, 2021), o qual apresenta os fatores de rendimento tanto dos resíduos do pescado, quanto dos efluentes da mandioca.

6.2.1. Rendimento de resíduos do pescado

Para o pescado, o relatório da CIbiogás apresenta um fator de rendimento de resíduos indicando que, para cada tonelada de produção, são gerados 563 kg de resíduos (0,563 toneladas).

Buscando outras referências na literatura, constata-se que esse valor de rendimento é compatível com achados de outros estudos (CAXEIXA, 2019; ROSSETO, 2021; SOUSA, 2019), os quais apontam valores próximos de rendimento de resíduos para o processamento do tambaqui, a espécie mais produzida na Região Norte.

Isto posto, a Equação 1 apresenta o cálculo realizado para definir a quantidade de resíduos do pescado (R_{pes}):

$$R_{pesc} = P_{pesc} \; x \; 0{,}563 \qquad \text{Equação 1}$$

Sendo:

-R_{pesc}: Resíduos de pescado em toneladas (ton);

-P_{pesc}: Produção de pescado em toneladas (ton).

6.2.2. Rendimento de efluentes da mandioca

No que tange aos resíduos do processamento mandioca, o relatório do CIBiogás os considera como efluentes, indicando que, para cada tonelada de mandioca produzida e processada, são gerados 1.500 litros de efluentes (1,5 metros cúbicos de resíduos).

A pesquisa na literatura (GRANADA, 2022; MARTINEZ, 2017; PEIXOTO, 2018; SIMÕES, 2021) evidencia que essa é a forma empregada para descrever o produto do processamento da mandioca, uma vez que vários são os derivados, compostos por diferentes tipos de resíduos, tanto sólidos, como a casca e entrecasca, como líquidos (por exemplo, a manipueira, um líquido que é extraído durante o processamento da mandioca).

A Equação 2 apresenta a base de cálculo utilizada nesta pesquisa para determinar a quantidade de efluentes gerada no processamento da mandioca:

$$Ef_{mand} = P_{mand}\ x\ 1{,}5 \qquad \text{(Equação 2)}$$

Sendo:

-Ef_{mand}: Efluente da mandioca em metro cúbico (m^3);

-P_{mand}: Produção de mandioca em toneladas (ton).

6.2.3. Produção de biogás e biometano

Primeiramente, foram realizados os cálculos de produção de biogás e biometano, considerando a digestão anaeróbia simples, isto é, realizando a análise da digestão anaeróbia individual do pescado e da mandioca, e não em co-digestão destes resíduos.

Vale lembrar que, para manter a padronização com o trabalho referência deste projeto, foram utilizados os valores de fator de conversão apresentados no relatório técnico do estudo da CIBiogás (INSTITUTO ESCOLHAS, 2021).

6.2.3.1. Biogás e biometano do pescado

De acordo com o Instituto Escolhas (2021), os resíduos do pescado apresentam um fator de produção de biogás de 180,36 metros cúbicos nas condições padrões (Nm^3), para cada tonelada de resíduo. Esse biogás gerado contém 55% de biometano na sua composição.

Partindo desses achados, definiu-se o modo de cálculo da produção de biogás a partir dos resíduos do pescado (Equação 3), enquanto que a Equação 4 indica a produção de biometano derivada a desses resíduos.

$$Bgas_{pesc} = R_{pesc}\ x\ 180{,}36 \quad \text{Equação 3}$$

$$Bmet_{pesc} = Bgas_{pesc}\ x\ 0{,}55 \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

- $Bgas_{pes}$: Biogás produzido a partir do pescado (Nm^3);

-$Bmet_{pes}$: Biometano produzido a partir do pescado (Nm^3);

-R_{pes}: Resíduos de pescado em toneladas (ton).

6.2.3.2. Biogás e biometano da mandioca

Ainda com base no Instituto Escolhas (2021), os efluentes do processamento da mandioca possuem um fator de geração de biogás de 3,67 metros cúbicos nas condições padrões, para cada metro cúbico de efluente. Esse biogás gerado apresenta 60% de biometano na sua composição.

A Equação 5 define a base de cálculo da produção de biogás a partir dos efluentes do processamento da mandioca, e a Equação 6 indica a produção de biometano a partir desses efluentes.

$$Bgas_{mand} = R_{mand}\ x\ 3{,}67 \quad \text{Equação 5}$$

$$Bmet_{mand} = Bgas_{mand}\ x\ 0{,}60 \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

- $Bgas_{mand}$: Biogás produzido a partir da mandioca (Nm^3);

-$Bmet_{mand}$: Biometano produzido a partir da mandioca (Nm^3);

-Ef_{mand}: Efluente do processamento da mandioca (m^3).

6.3. PRODUÇÃO DE ENERGIA

Com base nos valores relativos às quantidades de biometano produzidas, pode-se estimar a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada utilizando-se esse biocombustível.

Cabe destacar que o combustível gasoso gerado por cada tipo de resíduo apresenta características ligeiramente diversas, o que resulta em fatores de conversão em energia elétrica diferenciados.

6.3.1. Energia elétrica gerada pelo biometano derivado do pescado

O relatório do CIbiogás apresenta um fator de conversão de 3,75 kWh de energia elétrica para cada metro cúbico de biometano proveniente do pescado. A Equação 7 apresenta a base de cálculo da geração de energia elétrica a partir desse biocombustível:

$$Ee_{pesc} = Bmet_{pesc} \, x \, 3{,}75 \qquad \text{Equação 7}$$

Sendo:

- Ee_{pesc}: Energia elétrica produzida a partir do pescado (kWh);

-$Bmet_{pesc}$: Biometano produzido a partir do pescado (Nm^3).

6.3.2. Energia elétrica gerada a partir do biometano derivado da mandioca

Com relação ao biometano proveniente do processamento da mandioca, o fator de conversão apresentado pelo referido relatório é de 3,46 kWh de energia elétrica para cada metro cúbico do combustível gasoso. A Equação 8 apresenta a base de cálculo de geração de energia elétrica nesse caso:

$$Ee_{mand} = Bmet_{mand} \, x \, 3{,}46 \qquad \text{Equação 8}$$

Sendo:

- Ee_{mand}: Energia elétrica produzida a partir da mandioca (kWh);

-$Bmet_{mand}$: Biometano produzido a partir da mandioca (Nm^3).

6.3.3. Energia elétrica total e residências atendidas

Em diversos estudos sobre a geração de energia elétrica, utiliza-se a estimativa da quantidade de residências que podem ser atendidas com a energia gerada. Nesta pesquisa, tomou-se como referência o consumo médio de uma casa, estimado em 160 kWh/mês, que é o valor utilizado pelo Instituto Escolhas (2021), sendo também bem próximo da média levantada pela Empresa de Pesquisa Energética (INSTITUTO ESCOLHAS, 2021).

A base de cálculo da quantidade de residências atendidas com a energia elétrica total gerada (pescado + mandioca) é definida pela Equação 9.

$$N^{o}_{casas} = \frac{(Ee_{pesc} + Ee_{mand})}{(160 * 12)} \qquad \text{Equação 9}$$

Sendo:

- Ee_{pesc}: Energia elétrica produzida a partir do pescado (kWh);
- Ee_{mand}: Energia elétrica produzida a partir da mandioca(kWh);
- N^{o}_{casas}: Número de casas atendidas pela energia total gerada.

6.4. CO-DIGESTÃO DO PESCADO E DA MANDIOCA

Diversos estudos avaliam e apontam a influência positiva da co-digestão anaeróbia na quantidade de biogás produzida (BARROS, 2017; BORGES, 2021; LIMA, 2022; LOVATO, 2019; MARIN-BATISTA, 2016; VOLPI; 2021).

Alguns trabalhos ainda (AKSHAYA, 2018; SARKER, 2020; VIVEKANAND, 2017), avaliam a influência da co-digestão anaeróbia especificamente com os resíduos de pescado. Sousa (2022), ao analisar esses trabalhos relativos aos resíduos piscícolas descreve um aumento médio na produção de biogás, ao comparar os processos com e sem a co-digestão. Os achados desse autor apontam para uma produção média de biogás a partir da digestão simples dos resíduos do pescado era de 379,12 ml CH4/ g SV, e passou a ser 469,73 ml CH4/g SV quando realizado pelo processo de co-digestão. O que resultou em um fator de aumento de produção de biogás de 23,9%.

Diante disso, o cálculo da estimativa da quantidade de biogás produzido no processo de co-digestão do pescado e da mandioca, será realizado aplicando o fator de aumento de produção de biogás, ao somatório das produções de biogás já calculadas. Isso é apresentado pela EQUAÇÃO 10.

$$Bgas_{codg} = \left(Bgas_{pesc} + Bgas_{mand}\right) x\ 1{,}239 \qquad \text{Equação 10}$$

Sendo:

- $Bgas_{codg}$: Biogás produzido a partir da co-digestão (Nm^3);
- $Bgas_{pesc}$: Biogás produzido a partir do pescado (Nm^3);
- $Bgas_{mand}$: Biogás produzido a partir da mandioca (Nm^3).

6.4.1. Biometano da co-digestão

Conforme apresentado no cálculo da digestão anaeróbia simples, o percentual de biometano presente no biogás proveniente dos resíduos do pescado é diferente daquele gerado pelos efluentes da mandioca. O biogás derivado do pescado apresenta 55% de biometano em sua composição, ao passo que o produzido pelo processamento da mandioca possui 60%.

Partindo dessas diferenças, definiu-se uma média ponderada para determinar o percentual de biometano do biogás gerado a partir da co-digestão do pescado e da mandioca, utilizando-se como base de cálculo a Equação 11.

$$Bmet_{codg} = Bgas_{codg}\ x \left(\frac{\left(Bgas_{pesc}\ x\ 0{,}55\right) + \left(Bgas_{mand}\ x\ 0{,}60\right)}{Bgas_{pesc} + Bgas_{mand}}\right) \qquad \text{Equação 11}$$

Sendo:

- $Bmet_{codg}$: Biometano produzido a partir da co-digestão (Nm^3);
- $Bgas_{codg}$: Biogás produzido a partir da co-digestão (Nm^3);
- $Bgas_{pesc}$: Biogás produzido a partir do pescado (Nm^3);
- $Bgas_{mand}$: Biogás produzido a partir da mandioca (Nm^3).

6.4.2. Energia elétrica gerada pela co-digestão

De forma análoga ao que acontece no cálculo do biometano, o cálculo da energia elétrica gerada a partir do combustível produzido também possui fatores de conversão diferentes para os dois tipos de resíduos, o que torna necessário, no caso da co-digestão, empregar um fator de conversão ponderado.

A Equação 12 apresenta a base de cálculo da energia elétrica gerada no processo de co-digestão.

$$Ee_{codg} = Bmet_{codg}\ x \left(\frac{\left(Bgas_{pesc}\ x\ 3{,}75\right) + \left(Bgas_{mand}\ x\ 3{,}46\right)}{Bgas_{pesc} + Bgas_{mand}}\right) \qquad \text{Equação 12}$$

Sendo:

- Ee_{codg}: Energia elétrica produzida a partir da co-digestão (Nm^3);
- $Bmet_{codg}$: Biometano produzido a partir da co-digestão (Nm^3);
- $Bgas_{pesc}$: Biogás produzido a partir do pescado (Nm^3);
- $Bgas_{mand}$: Biogás produzido a partir da mandioca (Nm^3).

De posse dos valores de energia elétrica gerada, o cálculo da estimativa do número de residências que podem ser atendidas é realizado da mesma maneira apresentada no processo de digestão anaeróbia simples.

6.5. ANÁLISE DE VIABILIDADE

Todas as etapas anteriores já foram realizadas, e seus resultados são apresentados no item de Resultados Parciais deste relatório de qualificação. Com esses valores disponíveis, a próxima etapa do projeto é determinar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir da co-digestão dos resíduos do pescado e da mandioca.

Para a realização dessa análise econômica, faz-se necessário ir além da determinação de rasos e teóricos valores de custos e receitas. É preciso considerar todos os aspectos relacionados ao projeto da usina de geração de biogás e energia elétrica, desde a sua implantação e operação, até os esperados fluxos de caixas.

Por conseguinte, na etapa de análise de viabilidade econômica, será feita uma projeção de uma usina de geração de biogás e energia elétrica, considerando os diferentes cenários de cada município amazonense, para daí determinar tanto os custos de implantação e operação, quanto as receitas em função do fluxo de caixa.

Para a análise econômica visada, serão realizados cálculos fundamentados nos seguintes critérios: CAPEX, OPEX, Fluxo de Caixa, VPL e, quando possível, TIR e *Payback*.

6.5.1. CAPEX

O CAPEX (*Capital Expenditure*) é a sigla do termo econômico que designa os custos de implantação de um projeto. Para a presente pesquisa, o CAPEX engloba desde valores dos equipamentos da usina de geração de biogás e energia, até os custos com o terreno do local de instalação.

De uma forma simplificada, pode-se determinar o CAPEX de uma usina de geração biogás e energia elétrica por meio da Equação 13:

$$CPX = C_{eqp} + C_{ter} + C_{inf} + C_{leg} + C_{ext}$$ (Equação 13)

Sendo:

CPX = CAPEX do Projeto;

C_{eqp}= Custo com Equipamentos;

C_{ter}= Custo com Terreno;

C_{inf}= Custo com a Infraestrutura;

C_{leg}= Custo Legais;

C_{ext}= Demais Custos para Implantação

6.5.2. OPEX

A OPEX (*Operational Expenditure*) está relacionada com os custos relativos à operação de determinado projeto. Para esta pesquisa, a OPEX engloba desde os custos com insumo e mão de obra, até os gastos com logística e manutenção. A Equação 14 apresenta uma forma simples de determinação da OPEX.

$$OPX = C_{ins} + C_{mdo} + C_{log} + C_{man} + C_{ext}$$ Equação 14

Sendo:

OPX = OPEX do Projeto;

C_{ins}= Custo com Insumos;

C_{mdo}= Custo com Mão de Obra;

C_{log}= Custo de Logística;

C_{man}= Custo com Manutenção;

C_{ext}= Demais Custos de Operação

6.5.3. Fluxo de Caixa

Outro aspecto a ser considerado em uma análise de viabilidade econômica, são as receitas. Entretanto, é importante ter bastante cuidado e não considerar apenas a receita bruta que pode ser obtida, mas sim simular todo o fluxo de caixa do projeto.

Basicamente, para a esquematização de fluxo de caixa anual devem ser observadas as seguintes etapas:

1º - Determina-se a Receita Bruta (RB) por meio: a) das quantidades de insumos processados; b) da eficiência dos equipamentos e dos preços e volumes de vendas;

2º - Subtrai-se da RB os impostos sobre a vendas de produtos (IPI, ICMS, PIS e COFINS), obtendo assim a Receita Líquida Anual (RLA);

3º - Subtrai-se da RLA os custos de depreciações e operacionais, obtendo assim o Lucro Líquido Tributável (LTV);

4º - Subtrai-se do LTV o imposto de renda e a contribuição social, obtendo assim o Lucro Real Anual do projeto.

6.5.4. VPL

A sigla VPL se refere ao Valor Presente Líquido, o qual indica se determinado projeto é economicamente viável ou não. Basicamente, o VPL corrige os fluxos de caixa anuais futuros, para o ano zero, ou seja, para o ano de implantação do projeto. Pode-se assim determinar se o mesmo é viável ou não.

Para o cálculo de VPL é utilizada a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), basicamente a taxa de retorno mínima para se considerar o projeto viável. Geralmente utiliza-se uma TMA de 6%, que é valor condizente com os rendimentos de renda fixa.

Assim, um VPL positivo indica que o projeto é economicamente viável, enquanto um VPL negativo expressa a inviabilidade de um projeto do ponto de vista econômico. Pode-se determinar o VPL por intermédio da Equação 15:

$$VPL = \sum_{n=1}^{N} \frac{FC_t}{(1+i)^n} \qquad \text{(Equação 15)}$$

Sendo:

VPL = Valor Presente Líquido;

FC_t = Fluxo de Caixa no Ano “t”;

i = Taxa Mínima de Atratividade;

N = Período de Tempo da Análise.

6.5.5. TIR

A sigla TIR refere-se à Taxa Interna de Retorno, uma métrica que permite estimar a lucratividade do projeto. Para um projeto economicamente viável, a VPL será > 0, indicando que a TIR > TMA. O cálculo da TIR é apresentado na Equação 16.

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{FC_t}{(1+TIR)^n} = 0 \qquad \text{(Equação 16)}$$

Sendo:

TIR = Taxa Interna de Retorno;

FC_t = Fluxo de caixa no ano "t";

N = Período de tempo da análise.

6.5.6. Payback

O *Payback* é o termo econômico mais reconhecido e representa o tempo necessário para o retorno dos investimentos iniciais. Em um projeto com VPL positivo, o *Payback* leva em conta a TIR determinada do projeto, para o retorno do valor do CAPEX. O cálculo do *Payback* é feito por meio da Equação 17.

$$PB = \frac{CPX}{TIR} \qquad \text{(Equação 17)}$$

Sendo:

PB = *Payback*;

CPX = CAPEX do projeto;

TIR = Taxa Interna de Retorno.

7. RESULTADOS PARCIAIS

Conforme exposto, já foram realizados neste trabalho os cálculos de produção de biogás e de energia elétrica, tanto para o processo de digestão anaeróbia simples, quanto para o processo de co-digestão dos resíduos do pescado e da mandioca.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas etapas dos itens de 3.1 a 3.5 do procedimento metodológico deste relatório de qualificação.

7.1. PRODUÇÃO MUNICIPAL

As informações detalhadas da produção de mandioca, levantadas pelas pesquisas PPM e PAM (IBGE, 2022), são apresentadas nos ANEXOS A e B. Dessas informações compiladas, os dados de interesse para este estudo são as produções municipais de ambos produtos.

Os valores da produção de pescado foram organizados na coluna 2 da tabela síntese do APÊNDICE A, e os valores da produção da mandioca são delimitados na coluna 3 dessa mesma tabela.

Para fins de apresentação e análise, neste item de Resultados Parciais foi realizado um recorte, apresentando os três municípios que se destacam como maiores produtores de pescado e de mandioca, quantitativamente expostas na Tabela 5.

TABELA 5 – Maiores produtores de pescado e de mandioca no Amazonas

Localidade	**Produção de Pescado (*ton*)**	**Produção de Mandioca (*ton*)**
Rio Preto da Eva	2.130	1.900
Manaus	1.680	1.800
Iranduba	1.080	869
Manacapuru	149	125.787
Tefé	92	90.760
Manicoré	53	76.000
AMAZONAS	**8.614**	**767.634**

Fonte: IBGE, 2022.

Para facilitar as análises dos resultados, esta tabela de recorte está organizada, em todas as etapas, com os três maiores produtores de pescado aparecendo primeiro, seguidos dos três maiores produtores de mandioca.

7.2. RENDIMENTO DE RESÍDUOS

Os cálculos de resíduos gerados por cada produto foram realizados conforme o preconizado no item 3.2 dos Procedimentos Metodológicos. Relembrando que, no caso da mandioca, os resíduos são considerados como efluentes, sendo expressos, portanto, em unidade de volume (m^3).

As quantidades de resíduos do pescado, em cada município, estão apresentadas na coluna 4 da tabela síntese do APÊNDICE A, enquanto que o volume de efluentes da mandioca aparece na coluna 5 dessa tabela.

A Tabela 6, a seguir, apresenta as quantidades estimadas de resíduos gerados pelos dois produtos, para as localidades do recorte de análise:

TABELA 6 – Quantidade estimada de resíduos produzidos (pescado e mandioca) nos municípios do recorte do estudo

Localidade	**Resíduos do Pescado (*ton*)**	**Efluente da Mandioca (m^3)**
Rio Preto da Eva	1199,19	2.850
Manaus	945,84	2.700
Iranduba	608,04	1.304
Manacapuru	83,77	188.681
Tefé	51,96	136.140
Manicoré	29,84	114.000
AMAZONAS	**4.850**	**1.151.451**

Fonte: IBGE, 2022.

7.3. PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO

Os cálculos de produção foram realizados conforme previsto no item 3.2.3 do Procedimento Metodológico. É nessa etapa dos cálculos que pode-se perceber quais os produtos que têm maior potencial para a geração de energia, tendo em vista as produções observadas e os fatores de conversão.

7.3.1. Produção de Biogás

A estimativa da quantidade de biogás produzida a partir dos resíduos do pescado, em cada um dos municípios amazonenses, é descrita na coluna 6 da tabela do APÊNDICE A, enquanto a quantidade do biogás produzido a partir dos efluentes da mandioca é apresentada na coluna 7 dessa tabela.

A Tabela 7 apresenta as estimativas de produções de biogás, a partir de cada produto, nas localidades do recorte de análise:

TABELA 7 – Estimativas de produção de biogás nos municípios do recorte de estudo

Localidade	Biogás do Pescado (Nm^3)	Biogás da Mandioca (Nm^3)
Rio Preto da Eva	216.285,9	10.459,5
Manaus	170.591,7	9.909,0
Iranduba	109.666,1	4.783,8
Manacapuru	15.109,3	692.457,4
Tefé	9.372,4	499.633,8
Manicoré	5.381,8	418.380,0
AMAZONAS	**874.741**	**4.225.825**

Fonte: IBGE, 2022.

Como demonstra a Tabela 7, os efluentes da mandioca são responsáveis pela maior parte da produção de biogás no Estado. Isso acontece devido a maior quantidade produzida deste produto, quando comparada com a produção de pescado. Ainda que, o fator de conversão relativo da mandioca seja menor que o do pescado.

7.3.2. Produção de Biometano

Os valores relativos à produção de biometano a partir do pescado estão organizados na coluna 8 da tabela do APÊNDICE A, enquanto que os valores da produção do biometano provenientes da mandioca são apresentados na coluna 9. A Tabela 8, a seguir, apresenta os valores estimados para as localidades do recorte de análise.

TABELA 8 – Produção estimada de biometano nos municípios do recorte de estudo

Localidade	Biometano do Pescado (Nm^3)	Biometano da Mandioca (Nm^3)
Rio Preto da Eva	118.957,2	6.275,7
Manaus	93.825,4	5.945,4
Iranduba	60.316,4	2.870,3
Manacapuru	8.310,1	415.474,5
Tefé	5.154,8	299.780,3
Manicoré	2.960,0	251.028,0
AMAZONAS	**481.108**	**2.535.495**

Fonte: IBGE, 2022.

Os dados da Tabela 8 evidenciam que a quantidade de biometano obtida da mandioca, obviamente, continua sendo maior que a produzida a partir do biogás. Na verdade, essa

diferença é potencializada, tendo em vista que a concentração de biometano no biogás da mandioca é maior que a concentração no biogás do pescado.

7.4. PRODUÇÃO DE ENERGIA

Os cálculos de produção de energia foram realizados conforme o apresentado no item 1.4 do Procedimento Metodológico. E as estimativas das quantidades de energias neste item calculadas, referem-se àquelas obtidas através do processo de digestão anaeróbia simples de cada um dos produtos.

7.4.1 Energia elétrica por produto

Os valores estimados da quantidade de energia elétrica produzida a partir do pescado, são apresentados na coluna 10 do APÊNDICE A, enquanto os valores de energia provenientes da mandioca são descritos na coluna 11 da tabela.

A Tabela 9. a seguir, apresenta os valores estimados de energia produzida, por tipo de produto, para as localidades do recorte de análise.

TABELA 9 – Estimativa de energia produzida por tipo de produto nos municípios do recorte de estudo

Localidade	**Energia do Pescado (*kWh*)**	**Energia da Mandioca (*kWh*)**
Rio Preto da Eva	446.090	21.714
Manaus	351.845	20.571
Iranduba	226.186	9.931
Manacapuru	31.163	1.437.542
Tefé	19.331	1.037.240
Manicoré	11.100	868.557
AMAZONAS	**1.804.154**	**8.772.813**

Fonte: IBGE, 2022.

Considerando os dados acima, embora o fator de geração de energia do biometano obtido dos resíduos do pescado seja um pouco maior que o derivado da mandioca (cerca de 8%), isso não é altera o cenário de maior contribuição desta última, se forem considerados os montantes totais de produção e o respectivo potencial energético.

7.4.2. Produção Total de Energia

Como esta pesquisa não visa comparar a produção de energia de cada produto, e sim analisar a quantidade de energia gerada com a digestão isolada e a co-digestão desses produtos, o que interessa aqui é determinar qual é a produção de energia total do processo de

digestão anaeróbia. A quantidade estimada de produção total de energia elétrica é apresentada na penúltima coluna do APÊNDICE A, enquanto que a quantidade de residências que podem ser atendidas com essa geração de energia é exposta na última coluna.

A Tabela 10, a seguir, apresenta a estimativa da quantidade total de energia produzida no processo de digestão anaeróbia, bem como o número de residências que podem ser atendidas nas localidades do recorte de análise.

TABELA 10 – Estimativa da quantidade total de energia produzida na digestão anaeróbia e número de residências que podem ser atendidas nas localidades do recorte de análise

Localidade	**Energia Total (*kWh*)**	**Casas Atendidas**
Rio Preto da Eva	467.804	244
Manaus	372.416	194
Iranduba	236.118	123
Manacapuru	1.468.705	765
Tefé	1.056.570	550
Manicoré	879.657	458
AMAZONAS	**10.576.967**	**5.509**

Fonte: IBGE, 2022.

7.5. CO-DIGESTÃO DO PESCADO E DA MANDIOCA

Nesta etapa foi considerado o processo de co-digestão do pescado e da mandioca. Esse processo, em muitos casos, conforme apontam diferentes fontes da literatura, aumenta as quantidades produzidas de biogás, e também de biometano, ampliando, por conseguinte a capacidade de geração de energia elétrica.

7.5.1. Produção de biogás e biometano

Para o cálculo dos valores estimados de produção de biogás e biometano no processo de co-digestão dos resíduos do pescado e da mandioca, foi empregado o fator de aumento da produção de biogás na co-digestão determinado por Sousa (2022), e também a média ponderada das concentrações de biometano no biogás gerado. Os valores estimados, para as localidades do recorte de análise, são apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 – Estimativa da produção de biogás e biometano no processo de co-digestão de resíduos do pescado e da mandioca nas localidades do recorte do estudo.

Localidade	Biogás da Co-digestão (Nm^3)	Biometano da Co-digestão (Nm^3)
Rio Preto da Eva	280.937,6	155.163,6
Manaus	223.640,4	123.616,1
Iranduba	141.803,5	78.288,3
Manacapuru	876.675,2	525.069,1
Tefé	630.658,7	377.814,6
Manicoré	525.040,8	314.691,1
AMAZONAS	**6.319.602**	**3.737.571**

Fonte: IBGE, 2022.

Os valores completos relativos à co-digestão, abrangendo todos os municípios do Amazonas, são compilados no APÊNDICE B. Os valores estimados da quantidade de biogás obtida com a co-digestão são apresentados na sétima coluna dessa tabela, enquanto que os valores relativos à produção de biometano aparecem na oitava coluna.

7.5.2 Produção de energia por meio da co-digestão

A estimativa de energia elétrica produzida a partir da co-digestão dos resíduos dos produtos em análise é apresentada na Tabela 12, elencando também a quantidade de residências que podem ser atendidas nas localidades do recorte de análise.

TABELA 12 – Estimativa da produção de energia elétrica a partir da co-digestão de resíduos e quantidade de residências que podem ser atendidas

Localidade	Energia – Co-digestão (kWh)	Casas Atendidas
Rio Preto da Eva	579.788	302
Manaus	461.592	240
Iranduba	292.632	152
Manacapuru	1.819.991	948
Tefé	1.309.256	682
Manicoré	1.089.990	568
AMAZONAS	**13.109.513**	**6.828**

Fonte: IBGE, 2022.

Os valores da energia que pode ser produzida no processo de co-digestão, pertinentes a todos os municípios amazonenses, são apresentados na penúltima coluna da tabela síntese da co-digestão (APÊNDICE B), e a quantidade de residências atendidas é elencada na última coluna dessa tabela.

REFERÊNCIAS

ACHI, C. G.; HASSANEIN, A.; LANSING, S. Enhanced biogas production of cassava wastewater using zeolite and biochar additivesand manure co-digestion. **Energies**, v. 13, n. 491, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/491. Acesso em 15 Dez. 2022.

ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS P. G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspective. **Elsevier**, v. 36, p. 452-466. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975018300119?via%3Dihub. Acesso em 10 dez. 2023.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA PISCICULTURA PEIXE BR 2023. Disponível em: https://www.aen.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2023-03/anuariopeixebr2023.pdf Acesso em 02 jan. 2024.

AKSHAYA, N. B.; JACOB, S. Unification of waste mangement from fish and vegetable markets through anaerobic co-digestion. **Waste Biomass Valor,** n. 11, p. 1941–1951, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12649-018-0438-z Acesso em 22 jan. 2024.

BARROS, V. G.; DUDA, R. M.; VANTINI, J. S.; OMORI, W. P.; FERRO, M. I. T.; OLIVEIRA R. A. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria**. Bioresource Technology**, n. 244, p. 371-381, Nov. 2017.

BORGES, A.V.; FUESS, L. T.; ALVES, I.; TAKEDA, P. Y.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z. Co-digesting sugarcane vinasse and distilled glycerol to enhance bioenergy generation in biofuel-producing plants. **Energy Conversion and Management**, v. 250, n. 9, p. 114897, Dec. 2021.

BRASIL. **Decreto n. 11.628, de 04 de agosto de 2023**. Dispõe sobre o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11628.htm#art21 Acesso em 30 dez. 2023.

_____. Ministério da Pesca e Aquicultura. Disponível em <http://www.mpa.gov.br>Acesso em: 11 nov. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Boletim hortigranjeiro**. Especial pescados, v. 8, n. 4, abr. 2022.

BREYER, C.; KHALILI, S.; BOGDANOV, D.; RAM, M.; OYEWO, A. S.; AGHAHOSSEINI, A.; GULAGI, A.; SOLOMON, A. A.; KEINER, D.; LOPEZ, G.; OSTERGAARD, P. A.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V.; JACOBSON M. Z.; VICTORIA, M.; TESKE, S.; PREGGER, T.; FTHENAKIS, V.; RAUGEI, M.; HOLTTINEN, H.; BARDI, U.; HOEKSTRA, A.; SOVACOOL, B. On the history and future of 100% renewable energy systems research. **IEEE**, v. 10, p. 78176-78218, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193402. Acesso em 30 out. 2022.

CAXEIXA, L. A. R. **Estudo da viabilidade de implantação de técnica de reaproveitamento dos resíduos do frigorífico Frigopeixe em Tefé-AM**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2019.

CHOJNACKA, A.; SZCESNY, P.; BLASZCZYK, M.; ZIELENKIEWICZ, U.; DETMAN, A.; SALAMON, A.; SIKOR, A. Noteworthy facts about a metahne-producing microbial community processing acidic effluent from sugar beet molasses fermentation. **PlosS One**, v. 10, e. 0128008, 2015. Disponível em: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0128008. Acesso em 12 dez. 2023.

DERAL. Departamento de Economia Rural. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Departamento-de-Economia-Rural-Deral. Acesso em 22 Nov. 2022.

ESPA, I.; DURÁN, G. M. Renewable Energy subsides and WTO Law: Time to Rethink the Case for Reform Beyond Canada – Renewable Energy/Fit Program. **Journal of Internacional Economic Law**, v. 21, p. 621-653, 2018. Disponível em: https://academic.oup.com/jiel/articleabstract/21/3/621/5062663?redirectedFrom=fulltext. Acesso em: 20 Dez. 2022.

FEIZ, R.; JOHANSSON, M.; LINDKVIST, E.; MOESTEDT, J.; PALEDAL, S. N.; SVENSSON, N. Key performance indicators for biogas production from source separated food waste. **Energy**, v. 200, n. 117462, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-021-27919-9. Acesso em 25 Out. 2022.

GAJ, K. Adsorptive biogas purification from siloxanes – A critical review. **Energies**, v. 13, e. 13102605, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2605. Acesso em 15 fev. 2023.

GRANADO, M. P. P.; MACHADO, G. T.; PADILHA, E. R. D.; YAMAJI, F. M.; DE CONTI, A. C. **Torrefação do resíduo da mandioca para fins energéticos**. **Revista Virtual de Química,** v. 14, n. 1, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210095 Acesso em 18 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSICA - IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mandioca/br. Acesso em 15 nov. 2022.

IGNATOWICZ, K.; FILIPCZAK, G.; DYBEK, B.; WALOWSKI, G. Biogas production depending on the substrate used: a review and evaluation study – European Examples. **Energies**, v. 16, e. 16020798, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/798. Acesso em 07 nov. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção Agrícola Municipal** – PAM. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal** – PPM, 2022.

JIRAPRASERTWONG, A.; MAITRIWONG, K.; CHAVADEJ, S. Production of cassava wasterwater using a three-stage up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. **Elsevier**, v. 130, p. 191-205, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118306797?via%3Dihub. Acesso em 30 dez. 2023.

KOHMUEAN, P.; BOONROD, N.; WONGKBLAP, A. Biogas production from cassava waste: effect of concentration. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,** v. 778, n. 012115, 2019. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/778/1/012115. Acesso em 15 Dez. 2022.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. S.; DO AMARAL, A. C.; Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. **Embrapa**. Santa Catarina, 2019. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1108617/fundamentos-da-digestao-anaerobia-purificacao-do-biogas-uso-e-tratamento-do-digestato. Acesso em 12 dez. 2024.

LIMA, V. O. **Co-digestão anaeróbia de vinhaça e lodo de decantador de ETA aumenta a estabilidade de reatores UASB e a produção de metano**. 2022. 74 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal, 2022.

LOVATO, G.; ALBANEZ, R.; TRIVELONI, M.; RATUSZNEI, S. M.; RODRIGUES, J. A. Methane production by co-digesting vinasse and whey in an AnSBBR: effect of mixture ratio and feed strategy. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 187, n. 2, p. 28-46, Jan. 2019.

MABECUA, F.; SCHWEDE, S.; LUCAS, C.; KLINTENBERG, P. Agro-waste, a solution for rural electrification? Assessing biomethane potencial of agro-waste in Inhambane province, Southern Mozambique. **Water**, v. 13, n. 939, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/13/7/939. Acesso em 05 Dez. 2022.

MAIA, A. F. da S.; LEITE, B. F. W. Financiamento ao desenvolvimento alinhado aos ODS da ONU: a reorientação estratégica do BDMG. **Revista Tempo do Mundo**, n. 29, p. 271-294, Ago. 2022.

MARIN-BATISTA, J.; SALAZAR, L.; CASTRO, L.; ESCALANTE, H. Anaerobic co-digestion of vinasse and chicken manure: alternative for Colombian agrowaste management. **Revista Colombiana de Biotecnología**. v. XVIII, n. 2, p. 6-12, 2016.

MARTINEZ, D. G.; FEIDEN, A. Potencial do resíduo do processamento da mandioca para produção de etanol de segunda geração. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, Jun. 2017.

MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. da S.; GUIMARÃES, D. D. Biogas: recent evolution and potential of a new frontier for renewable energy in Brazil. **BNDES Set**., v. 27, n. 53, p. 177-216, Mar. 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20801/1/PR_Biogas_215276_P_BD.pdf. Acesso em 25 dez. 2022.

]

MONDEBACH, A. A.; NOKES, S. E. Enzymatic Hydrolysis of biomass at high-solids loadings – A review. **Elsevier**, v. 56, p. 526-544, 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953413002948?via%3Dihub. Acesso em 07 dez. 2022.

MONTEIRO, M. R. S. *et al*. Produção de gás a partir de manipueira adicionada de complexo enzimático bruto e lodo de estação de tratamento de esgoto. *In*: ANDRADE, D. F. *et al*. **Processos Químicos e Biotecnológicos**. Volume 8. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2021.

NEVES, E. C. A.; NASCIMENTO, G. C.; FERREIRA, A. R.; NEVES, D. A.; FUKUSHIMA, A. R.; LEONI, L. A. B.; CLERICI, M. T. P. S. Classification, nutricional and technological characteristics of cassava flour marketed in Belém, Pará, Brazil. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, e2019143, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1981-6723.14319. Acesso em 07 dez. 2022.

OLIVEIRA, A. C. de; SOKULSKI, C.; BATISTA, A. A. da S.; FRANCISCO, A. C. de. Competências para a sustentabilidade: uma proposta de método para análise de suas inter-relações. **Produção e Consumo Sustentáveis**, v. 14, p. 82-94, Abr. 2018.

PEIXOTO, T. S.; RESCH, S. Resíduos da Mandioca: um estudo sobre a destinação da massa de mandioca pelas fecularias brasileiras. 2. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 2, n. 1, 19 Dez. 2018.

ROSSETTO, J.; SIGNOR, A. Inovações tecnológicas empregadas em coprodutos gerados pelo processamento do pescado. **PUBVET**, v.15, n. 4, a796, p.1-11, Abr., 2021.

SARKER, S. By-products of fish-oil refinery as potencial substrates for biogas production in Norway: A preliminary study. **Results in Engineering**, v. 6, 100137, 2020. Disponível em: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2656075/Sarker.pdf?sequence=2&isAllowed=y Acesso em 19 dez. 2023.

SI, X.; LU, R.; ZHAO, Z.; YANG, X.; WANG, F.; JIANG, H.; LUO, X.; WANG, A.; FENG, Z.; XU, J.; LU, F. Catalytic production of low-carbon footprint sustainable natural gas. **Nature Communications**, v.13, p. 258, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-021-27919-9. Acesso em 26 nov. 2022.

SIMÕES, A. L. de C. C. **Produção de amilases por cultivo em estado sólido e hidrólise enzimática de resíduos de mandioca**. 2021. 70 f. Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT, 2021.

SOUSA, L. M. B. **Revisão sistemática sobre uso de resíduos de pescados para a produção de biogás e bioprodutos**. 2022. 52 f. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação em Bioprodutos e Bioprocessos – Instituto de Saúde e Sociedade, Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, 2022.

VIVEKANAND, V.; MULAT, D. G.; EIJSINK, V. G. H.; HORN, S. J. Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. **Bioresource Technology**. **Bioresource Technology**, n. 249, p. 35-41, Feb. 2018.

VOLPI, M. P. C.; JUNIOR, A. D. N. F.; FRANCO, T. T.; MORAES, B. S. Operational and biochemical aspects of co-digestion (co-AD) from sugarcane vinasse, filter cake, and

deacetylation liquor. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.105, n. 23, p. 8969-8987, Dec. 2021.

ZHANG, Y.; LI, H.; LI, D. Maximize methane recovery from sludge anaerobic digestion by combining an optimal wet air oxidation process. **Renewable Energy** , v. 179, p. 359-369, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121010569?via%3Dihub. Acesso em: 03 mar. 2022.

ANEXO A – PRODUÇÃO MUNICIPAL DE PESCADO NO AMAZONAS – PPM (ton)

	Curimatã	Matrinxã	Pirapitinga	Pirarucu	Tambacu	Tambaqui	Tucunaré	TODOS
Rio Preto da Eva	0	880000	0	0	0	1250000	0	2,130,000
Manaus	0	580000	0	0	0	1100000	0	1,680,000
Iranduba	0	70000	0	10000	0	1000000	0	1,080,000
ApuÃ-	0	0	0	0	0	530000	0	530,000
Coari	0	45000	0	55000	0	320000	0	420,000
Presidente Figueiredo	0	110000	0	0	0	290000	0	400,000
Careiro	0	0	0	0	0	260000	0	260,000
HumaitÃ¡	0	0	0	0	0	190000	0	190,000
Benjamin Constant	1500	58000	0	0	0	110000	0	169,500
Manaquiri	0	0	0	0	0	150000	0	150,000
Manacapuru	0	8785	0	130885	0	9128	0	148,798
Envira	0	700	0	0	0	130000	0	130,700
TefÃ©	0	29500	3800	0	0	59000	0	92,300
CodajÃ¡s	0	1900	0	35000	0	50000	0	86,900
SÃ£o Gabriel da Cachoeira	0	13600	0	0	0	45000	15000	73,600
AmaturÃ¡	0	31000	0	0	0	42000	0	73,000
Careiro da VÃ¡rzea	0	7000	0	0	0	65000	0	72,000
MauÃ©s	0	23000	0	11000	0	38000	0	72,000
GuajarÃ¡	0	35500	0	0	0	35500	0	71,000
Nova Olinda do Norte	0	0	0	11000	0	53000	0	64,000
Boca do Acre	0	0	0	0	0	56000	0	56,000
ManicorÃ©	0	0	0	25000	0	28000	0	53,000
Novo AripuanÃ£	0	3500	0	0	0	48000	0	51,500
Borba	0	0	0	0	0	50000	0	50,000
Novo AirÃ£o	0	27000	0	0	0	21200	0	48,200
Pauini	0	0	0	12000	5,000	25000	0	42,000
Itacoatiara	0	9000	0	0	0	31000	0	40,000
Caapiranga	0	2500	0	0	0	36000	0	38,500
SÃ£o Paulo de OlivenÃ§a	0	1750	0	10000	0	25000	0	36,750
Carauari	0	30000	0	2400	0	4000	0	36,400
Ipixuna	0	7900	3856	0	0	22300	0	34,056
Santo AntÃ´nio do IÃ§Ã¡	0	14000	0	0	0	18000	0	32,000
Autazes	0	0	0	0	0	28000	0	28,000
Silves	0	28000	0	0	0	0	0	28,000
Anori	0	4500	0	14000	0	7500	0	26,000
Tabatinga	0	20000	0	0	0	3000	0	23,000
JutaÃ-	0	3000	0	0	0	14600	0	17,600
EirunepÃ©	0	0	5100	0	0	11500	0	16,600
Parintins	0	0	0	0	0	15000	0	15,000
Atalaia do Norte	2000	0	0	0	0	10000	0	12,000
Boa Vista do Ramos	0	0	0	0	0	10000	0	10,000
AlvarÃ£es	0	2100	55	0	0	5200	0	7,355
JapurÃ¡	0	0	0	0	0	6480	0	6,480
Fonte Boa	0	1200	0	1080	0	3200	0	5,480
TapauÃ¡	0	0	0	0	0	3500	0	3,500
Barcelos	0	0	0	2300	0	1000	0	3,300
Barreirinha	0	0	0	0	0	0	0	0
Canutama	0	0	0	0	0	0	0	0
JuruÃ¡	0	0	0	0	0	0	0	0
MaraÃ£	0	0	0	0	0	0	0	0
AnamÃ£	0	0	0	0	0	0	0	0
Beruri	0	0	0	0	0	0	0	0
Itamarati	0	0	0	0	0	0	0	0
Itapiranga	0	0	0	0	0	0	0	0
LÃ¡brea	0	0	0	0	0	0	0	0
NhamundÃ¡	0	0	0	0	0	0	0	0
Santa Isabel do Rio Negro	0	0	0	0	0	0	0	0
SÃ£o SebastiÃ£o do UatumÃ£	0	0	0	0	0	0	0	0
Tonantins	0	0	0	0	0	0	0	0
Uarini	0	0	0	0	0	0	0	0
UrucarÃ¡	0	0	0	0	0	0	0	0
Urucurituba	0	0	0	0	0	0	0	0
AMAZONAS	3,500	2,048,435	12,811	319,665	5,000	6,210,108	15,000	8,614,519

ANEXO B – PRODUÇÃO MUNICIPAL DE MANDIOCA – AMAZONAS – PAM (ton)

Município	
Alvarães	50,180
Amaturá	2,424
Anamã	1,000
Anori	1,600
Apuá	8,320
Atalaia do Norte	3,259
Autazes	66,000
Barcelos	225
Barreirinha	1,200
Benjamin Constant	2,820
Beruri	330
Boa Vista do Ramos	4,200
Boca do Acre	3,835
Borba	14,350
Caapiranga	520
Canutama	2,220
Carauari	9,120
Careiro	7,320
Careiro da VÃ¡rzea	1,200
Coari	11,500
Codajás	5,100
Eirunepé	1,600
Envira	4,200
Fonte Boa	1,900
Guajará	738
Humaitá	60,000
Ipixuna	1,500
Iranduba	869
Itacoatiara	14,080
Itamarati	3,000
Itapiranga	7,200
Japurá	3,023
Juruá	915
Jutaí	8,700
Lábrea	15,600
Manacapuru	125,787
Manaquiri	7,320
Manaus	1,800
Manicoré	76,000
Maraã	472
Maués	18,400
Nhamundá	6,000
Nova Olinda do Norte	18,000
Novo Airão	2,400
Novo Aripuanã	13,130
Parintins	6,960
Pauini	9,074
Presidente Figueiredo	1,650
Rio Preto da Eva	1,900
Santa Isabel do Rio Negro	1,461
Santo Antpnio do Içá	850
São Gabriel da Cachoeira	410
São Paulo de Olivença	90
São Sebastiao do Uatumã	5,800
Silves	8,400
Tabatinga	1,440
Tapauá	33,670
Tefé	90,760
Tonantins	2,592
Uarini	6,720
Urucará	5,060
Urucurituba	1,440
AMAZONAS	767,634

APÊNDICE A

Coluna1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13
Município	**Produção - Pescado (kg)**	**Produção Mandioca (ton)**	**Resíduos - Pescado (ton)**	**Resíduos - Mandioca (m^3)**	**Biogás - Pescado (Nm^3)**	**Biogás - Mandioca (Nm^3)**	**Biometano - Pescado (Nm^3)**	**Biometano - Mandioca (Nm^3)**	**Energia - Pescado (kWh)**	**Energia - Mandioca (kWh)**	**Energia Total (kWh)**	**Casas Atendidas**
Alvarães	7,355	50,180	4.14	75,270	746.8	276,240.9	410.8	165,744.5	1,540	573,476	575,016	299
Amaturá	73,000	2,424	41.10	3,636	7,412.6	13,344.1	4,076.9	8,006.5	15,289	27,702	42,991	22
Anamã	0	1,000	0.00	1,500	0.0	5,505.0	0.0	3,303.0	0	11,428	11,428	6
Anori	26,000	1,600	14.64	2,400	2,640.1	8,808.0	1,452.1	5,284.8	5,445	18,285	23,731	12
Apuá	530,000	8,320	298.39	12,480	53,817.6	45,801.6	29,599.7	27,481.0	110,999	95,084	206,083	107
Atalaia do Norte	12,000	3,259	6.76	4,889	1,218.5	17,940.8	670.2	10,764.5	2,513	37,245	39,758	21
Autazes	28,000	66,000	15.76	99,000	2,843.2	363,330.0	1,563.8	217,998.0	5,864	754,273	760,137	396
Barcelos	3,300	225	1.86	338	335.1	1,238.6	184.3	743.2	691	2,571	3,263	2
Barreirinha	0	1,200	0.00	1,800	0.0	6,606.0	0.0	3,963.6	0	13,714	13,714	7
Benjamin Constant	169,500	2,820	95.43	4,230	17,211.5	15,524.1	9,466.3	9,314.5	35,499	32,228	67,727	35
Beruri	0	330	0.00	495	0.0	1,816.7	0.0	1,090.0	0	3,771	3,771	2
Boa Vista do Ramos	10,000	4,200	5.63	6,300	1,015.4	23,121.0	558.5	13,872.6	2,094	47,999	50,094	26
Boca do Acre	56,000	3,835	31.53	5,753	5,686.4	21,111.7	3,127.5	12,667.0	11,728	43,828	55,556	29
Borba	50,000	14,350	28.15	21,525	5,077.1	78,996.8	2,792.4	47,398.1	10,472	163,997	174,469	91
Caapiranga	38,500	520	21.68	780	3,909.4	2,862.6	2,150.2	1,717.6	8,063	5,943	14,006	7
Canutama	0	2,220	0.00	3,330	0.0	12,221.1	0.0	7,332.7	0	25,371	25,371	13
Carauari	36,400	9,120	20.49	13,680	3,696.2	50,205.6	2,032.9	30,123.4	7,623	104,227	111,850	58
Careiro	260,000	7,320	146.38	10,980	26,401.1	40,296.6	14,520.6	24,178.0	54,452	83,656	138,108	72
Careiro da Várzea	72,000	1,200	40.54	1,800	7,311.1	6,606.0	4,021.1	3,963.6	15,079	13,714	28,793	15
Coari	420,000	11,500	236.46	17,250	42,647.9	63,307.5	23,456.4	37,984.5	87,961	131,426	219,388	114
Codajás	86,900	5,100	48.92	7,650	8,824.1	28,075.5	4,853.2	16,845.3	18,200	58,285	76,484	40
Eirunepé	16,600	1,600	9.35	2,400	1,685.6	8,808.0	927.1	5,284.8	3,477	18,285	21,762	11
Envira	130,700	4,200	73.58	6,300	13,271.6	23,121.0	7,299.4	13,872.6	27,373	47,999	75,372	39

Fonte Boa	5,480	1,900	3.09	2,850	556.5	10,459.5	306.0	6,275.7	1,148	21,714	22,862	12
Guajará	71,000	738	39.97	1,107	7,209.5	4,062.7	3,965.2	2,437.6	14,870	8,434	23,304	12
Humaitá	190,000	60,000	106.97	90,000	19,293.1	330,300.0	10,611.2	198,180.0	39,792	685,703	725,495	378
Ipixuna	34,056	1,500	19.17	2,250	3,458.1	8,257.5	1,902.0	4,954.5	7,132	17,143	24,275	13
Iranduba	1,080,000	869	608.04	1,304	109,666.1	4,783.8	60,316.4	2,870.3	226,186	9,931	236,118	123
Itacoatiara	40,000	14,080	22.52	21,120	4,061.7	77,510.4	2,233.9	46,506.2	8,377	160,912	169,289	88
Itamarati	0	3,000	0.00	4,500	0.0	16,515.0	0.0	9,909.0	0	34,285	34,285	18
Itapiranga	0	7,200	0.00	10,800	0.0	39,636.0	0.0	23,781.6	0	82,284	82,284	43
Japurá	6,480	3,023	3.65	4,535	658.0	16,641.6	361.9	9,985.0	1,357	34,548	35,905	19
Juruá	0	915	0.00	1,373	0.0	5,037.1	0.0	3,022.2	0	10,457	10,457	5
Jutaí	17,600	8,700	9.91	13,050	1,787.2	47,893.5	982.9	28,736.1	3,686	99,427	103,113	54
Lábrea	0	15,600	0.00	23,400	0.0	85,878.0	0.0	51,526.8	0	178,283	178,283	93
Manacapuru	148,798	125,787	83.77	188,681	15,109.3	692,457.4	8,310.1	415,474.5	31,163	1,437,542	1,468,705	765
Manaquiri	150,000	7,320	84.45	10,980	15,231.4	40,296.6	8,377.3	24,178.0	31,415	83,656	115,071	60
Manaus	1,680,000	1,800	945.84	2,700	170,591.7	9,909.0	93,825.4	5,945.4	351,845	20,571	372,416	194
Manicoré	53,000	76,000	29.84	114,000	5,381.8	418,380.0	2,960.0	251,028.0	11,100	868,557	879,657	458
Maraã	0	472	0.00	708	0.0	2,598.4	0.0	1,559.0	0	5,394	5,394	3
Maués	72,000	18,400	40.54	27,600	7,311.1	101,292.0	4,021.1	60,775.2	15,079	210,282	225,361	117
Nhamundá	0	6,000	0.00	9,000	0.0	33,030.0	0.0	19,818.0	0	68,570	68,570	36
Nova Olinda do Norte	64,000	18,000	36.03	27,000	6,498.7	99,090.0	3,574.3	59,454.0	13,404	205,711	219,114	114
Novo Airão	48,200	2,400	27.14	3,600	4,894.4	13,212.0	2,691.9	7,927.2	10,095	27,428	37,523	20
Novo Aripuanã	51,500	13,130	28.99	19,695	5,229.4	72,280.7	2,876.2	43,368.4	10,786	150,055	160,840	84
Parintins	15,000	6,960	8.45	10,440	1,523.1	38,314.8	837.7	22,988.9	3,141	79,542	82,683	43
Pauini	42,000	9,074	23.65	13,611	4,264.8	49,952.4	2,345.6	29,971.4	8,796	103,701	112,497	59
Presidente Figueiredo	400,000	1,650	225.20	2,475	40,617.1	9,083.3	22,339.4	5,450.0	83,773	18,857	102,630	53
Rio Preto da Eva	2,130,000	1,900	1199.19	2,850	216,285.9	10,459.5	118,957.2	6,275.7	446,090	21,714	467,804	244
Santa Isabel do Rio Negro	0	1,461	0.00	2,192	0.0	8,042.8	0.0	4,825.7	0	16,697	16,697	9
Santo Antonio do Içá	32,000	850	18.02	1,275	3,249.4	4,679.3	1,787.2	2,807.6	6,702	9,714	16,416	9
São Gabriel da Cachoeira	73,600	410	41.44	615	7,473.5	2,257.1	4,110.4	1,354.2	15,414	4,686	20,100	10
São Paulo de Olivença	36,750	90	20.69	135	3,731.7	495.5	2,052.4	297.3	7,697	1,029	8,725	5

São Sebastião do Uatumã	0	5,800	0.00	8,700	0.0	31,929.0	0.0	20,157.4	0	66,285	66,285	35
Silves	28,000	8,400	15.76	12,600	2,843.2	46,242.0	1,563.8	27,745.2	5,864	95,998	101,862	53
Tabatinga	23,000	1,440	12.95	2,160	2,335.5	7,927.2	1,284.5	4,756.3	4,817	16,457	21,274	11
Tapauá	3,500	33,670	1.97	50,505	355.4	185,353.4	195.5	111,212.0	733	384,794	385,527	201
Tefé	92,300	90,760	51.96	136,140	9,372.4	499,633.8	5,154.8	299,780.3	19,331	1,037,240	1,056,570	550
Tonantins	0	2,592	0.00	3,888	0.0	14,269.0	0.0	8,561.4	0	29,622	29,622	15
Uarini	0	6,720	0.00	10,080	0.0	36,993.6	0.0	22,196.2	0	76,799	76,799	40
Urucará	0	5,060	0.00	7,590	0.0	27,855.3	0.0	16,713.2	0	57,828	57,828	30
Urucurituba	0	1,440	0.00	2,160	0.0	7,927.2	0.0	4,756.3	0	16,457	16,457	9
AMAZONAS	**8,614,519**	**767,634**	**4,850**	**1,151,451**	**874,741**	**4,225,825**	**481,108**	**2,535,495**	**1,804,154**	**8,772,813**	**10,576,967**	**5,509**