



**Universidade Politécnica
A POLITÉCNICA**

INSTITUTO SUPERIOR DE GESTÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS-ISGCT

Departamento de Engenharia

Licenciatura em Engenharia Ambiental

**PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA A PRODUÇÃO
DE BIOFERTILIZANTE: ESTUDO DE CASO INSTITUTO AGRÁRIO DE BOANE**

Núria Suzana Amiel Bunzula

Estudante n°: 552567

Maputo, Agosto de 2025

Núria Suzana Amiel Banzula

**PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA A PRODUÇÃO
DE BIOFERTILIZANTE: ESTUDO DE CASO INSTITUTO AGRÁRIO DE BOANE**

Monografia apresentada a Universidade
Politécnica - À politécnica Instituto
Superior de Gestão Ciências e
Tecnologia (ISGCT) como requisito
para a obtenção do Grau de
licenciatura em Engenharia Ambiental.

Supervisora: dra. Carina Helena Mariano

Maputo, Agosto de 2025

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aos _____ de _____ de _____ a presente Monografia foi apresentada, numa defesa pública, na qual lavrou-se uma Acta onde consta que o autor foi aprovado com a classificação de _____ valores, feita pelos seguintes Membros de Júri:

Presidente

Supervisor

Arguente

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Núria Suzana Amiel Buzula**, declaro por minha honra que esta Monografia foi, exclusivamente, realizada por mim, constitui resultado da minha investigação pessoal e é submetida de acordo com os requisitos e exigências para obtenção do grau de Licenciatura na Universidade Politécnica em Maputo.

Assinatura

(Núria Suzana Amiel Buzula)

PARECER DO SUPERVISOR

Eu, Carina Helena Mariano, declaro que supervisionei e acompanhei o trabalho de final do curso, sob a forma de Monografia da estudante **Núria Suzana Amiel Bunzula**, cujo tema é **Proposta de Implementação de um Biodigestor para o Aproveitamento de Resíduos Agrícolas: Estudo de Caso Instituto Agrário de Boane**.

Declaro que o trabalho é da autoria da Estudante e reúne todos os requisitos pré-estabelecidos pela Universidade Politécnica para trabalhos desta natureza, pelo que considero-o pronto para defesa pública.

Maputo, Agosto de 2025

(Licenciada Carina Helena Mariano)

EPÍGRAFE

“Desistir” ... Eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério; é que tem mais chão nos meus olhos do que o cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

Cora Carolina

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Natacha Catarina da Silva Amiel, por tudo que faz por mim enquanto viva, pela resiliência, por mostrar como a vida realmente é, pelo carinho, amor e dedicação que depositou em mim, durante este percurso acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos derramadas sobre mim e minha família. Hoje mais um ciclo se encerra, e se não fosse pela sua bondade e imensurável graça nada disso estaria a acontecer, por isso, minha eterna gratidão ao Senhor Deus por me guiar até aqui.

Sou grata aos meus Pais, Pascoal Buzula (em memória) e Natacha Catarina Da Silva Amiel, por cuidarem de mim, arcarem com todos custos da minha formação e por serem tudo que sou hoje, não há nada que eu possa fazer para demonstrar tamanha gratidão.

Aos meus irmãos, Jéssica Rodrigues e Owen Buzula que celebram as minhas vitórias como se fossem suas, meu sincero agradecimento por fazerem parte desta conquista enriquecendo-a com seu amor e orgulho.

Especial agradecimento a dra. Carina Helena Mariano, por me ter orientado e guiado na materialização deste trabalho, com tamanha atenção, paciência, carinho e disponibilidade.

A minha tia, Msc Fátima Hassamo, que figurou como co-supervisora desta monografia e, em nenhum momento deixou-me fraquejar, sempre esteve ao meu lado, com paciência, atenção e carinho, dando o devido suporte.

Ao Professor Doutor Engenheiro Jonas Valente Matsinhe, pela orientação, apoio técnico e dedicação ao longo da realização deste trabalho, cuja contribuição foi essencial para o desenvolvimento e qualidade da presente pesquisa.

Os agradecimentos estendem-se aos meus colegas Marvén, Yandra e Jenifa pela amizade, força e companheirismo durante o percurso estudantil.

À todos aqueles que directa ou indirectamente, auxiliaram-me ao longo desta caminhada e contribuíram para que este trabalho pudesse se tornar uma realidade, a minha profunda gratidão.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS e ACRÓNIMOS

IAB	Instituto Agrário de Boane
MS	Matéria sólida
MOS	Matéria orgânica seca
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo
N	Nitrogénio
p ^H	Potência de hidrogénio
OH	Hidroxila
PVC	Policloreto de vinila
PCS	Poder calorífico do combustível superior
PCI	Poder calorífico do combustível inferior
H ₂ S	Gás sulfídrico
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
N, P, K	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
PTMd	Produção Total de Matéria diária
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
FAO	Food and Agriculture Organization

Índice de Tabelas

Tabela 1: Propriedades dos resíduos verdes	10
Tabela 2: Matéria- prima com potencial de produção de Biofertilizante.	12
Tabela 3: Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos	15
Tabela 4: Percentagem de gases no biofertilizante	16
Tabela 5: Composição típica do biogás.	20
Tabela 6: Densidade populacional de indivíduos culturais por área no IAB.....	29
Tabela 7: Relação, resíduo e produção por tipo de cultura no IAB.....	30
Tabela 8: Relação área de plantação, produção e quantidade de resíduos no IAB.....	33
Tabela 9: Adaptação do modelo da Marinha Brasileira para o IAB.....	34
Tabela 10: Resumo dos resultados obtidos	41
Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos.....	42

Índice de Figuras

Figura 1: Classificação da Biomassa Quanto a origem.	8
Figura 2: Esquema das etapas da digestão anaeróbia.	13
Figura 3: Aplicações do digestato.	19
Figura 4: Composição do Biodigestor	22
Figura 5: Biodigestor do modelo chinês	23
Figura 6: Biodigestor do modelo indiano.	24
Figura 7: Biodigestor do modelo da marinha brasileira.	25
Figura 8: Mapa de localização do IAB.	28
Figura 9: Gráfico de percentagem das áreas de produção por cultura no IAB.	29
Figura 10: Sistema de biodigestor do modelo da marinha brasileira implementado.	34

RESUMO

A presente pesquisa abordou o tema sobre a proposta de implementação de um biodigestor para o aproveitamento de resíduos agrícolas: estudo de caso Instituto Agrário de Boane. Objectivando estudar formas de aproveitamento dos resíduos agrícolas resultantes das colheitas no Instituto Agrário de Boane, para a produção de biofertilizante. O desenvolvimento da pesquisa deve-se as formas de gestão dos resíduos por parte do IAB que, após a colheita e separação dos produtos, os resíduos direccionam para a queima, emitindo desta via gases do efeito estufa que ao longo do tempo, provocam efeitos catastróficos no clima a nível global. No entanto, com a pesquisa pretendeu-se responder à questão de partida, sobre quais os impactos ambientais decorrentes da forma de gestão de resíduos agrícolas no IAB. Desta forma, para se alcançar o objectivo da pesquisa, identificou-se os variados tipos de biodigestor que transformam os resíduos agrícolas em biofertilizante a fim de identificar o que se adequa a realidade do instituto onde primeiramente caracterizou-se e estimou-se a capacidade dos resíduos produzidos no IAB, de produzir o biogás e por fim analisou-se os ganhos que o instituto terá ao adoptar o sistema de transformação dos resíduos em biofertilizante. No sentido técnico, o trabalho apontou os números em termos de quantidades de resíduos que possibilitam a obtenção de biofertilizante a partir da sua decomposição por células anaeróbicas nos biodigestores do Instituto Agrário de Boane. No sentido ambiental, aponta-se a necessidade de se destinar melhor os resíduos, podendo gerar múltiplos benefícios, especialmente no uso agrícola e na recuperação do solo, contribuindo também para a redução de impactos ambientais negativos.

Palavras- chaves: resíduos agrícolas, biodigestor, biofertilizantes.

ABSTRACT

This research addressed the topic of the proposed implementation of a biodigester for the use of agricultural residues: a case study of the Agrarian Institute of Boane. It aimed to study ways of utilizing agricultural residues resulting from harvests at the Agrarian Institute of Boane for the production of biofertilizer. The motivation for the research stems from the current waste management practices at the IAB, where, after the harvest and separation of products, the residues are burned, releasing greenhouse gases that, over time, contribute to catastrophic global climate effects. The research sought to answer the guiding question regarding the environmental impacts resulting from the current methods of agricultural waste management at the IAB. To achieve the objective of the study, various types of biodigesters capable of transforming agricultural residues into biofertilizer were identified, in order to determine the most appropriate model for the institute's reality. Initially, the residues generated at the IAB were characterized and their capacity to produce biofertilizer was estimated. Finally, the potential benefits for the institute in adopting a system for transforming residues into biofertilizer were analyzed. From a technical perspective, the study presented quantitative data on the amount of residues that can be converted into biofertilizer through anaerobic decomposition in biodigesters at the Agrarian Institute of Boane. From an environmental perspective, the study highlights the need for better waste destination, which can generate multiple benefits, especially in agricultural use and soil recovery, also contributing to the reduction of negative environmental impacts.

Keywords: agricultural waste, biodigester, biofertilizers.

Índice

DECLARAÇÃO DE HONRA.....	i
PARECER DO SUPERVISOR	ii
EPÍGRAFE	iii
DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS e ACRÓNIMOS	vi
Índice de Tabelas	vii
Índice de Figuras.....	viii
RESUMO.....	ix
CAPÍTULO I- INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Introdução	1
1.2. Problema de pesquisa.....	3
1.2.1. Enquadramento do problema de pesquisa.....	3
1.3. Pergunta de partida	4
1.4. Justificativa da pesquisa.....	4
1.5. Objectivos	5
1.5.1. Objectivo geral.....	5
1.5.2. Objectivos específicos.....	5
1.6. Hipóteses.....	5
CAPÍTULO II- REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1. Biofertilizante	6
2.2. Resíduos Orgânicos	6
2.3. Biomassa	7
2.3.1. Classificação da Biomassa Quanto a Origem	8

2.3.2. Classificação da Biomassa Quanto ao uso	9
2.3.4. Propriedades dos resíduos verdes.....	10
2.4. Biofertilizante e Processos de Formação	10
2.4.1. Processo de fermentação anaeróbia	12
2.4.2. Factores que influenciam a digestão anaeróbia.....	14
2.4.4. Composição do biofertilizante	16
2.4.6. Aplicação do digestato	18
2.4.7. Vantagens do digestato	19
2.5. Biogás	20
2.6. Biodigestores.....	21
2.6.1 Modelos de Biodigestores.....	23
2.6.1.1 Biodigestor Modelo Marinha Brasileira.....	24
CAPÍTULO III- METODOLOGIA	26
3.1. Tipo de estudo e desenho da pesquisa	26
3.1.1. Quanto a natureza da pesquisa	26
3.1.2. Quanto a forma de abordagem do problema.....	26
3.1.3. Quanto ao objectivo da pesquisa.....	26
3.2. Técnicas e instrumentos de recolha de dados	27
3.2.1. Pesquisa bibliográfica	27
3.2.2. Pesquisa documental	27
3.2.3. Observação directa.....	27
3.3. Localização da área de estudo.....	28
3.4. Caracterização da área de estudo	28
3.5. Espaçamento e Densidade.....	29
3.6. Padrões de Produção dos resíduos por algumas culturas	32

3.6.1. Banana.....	32
3.6.2. Mandioca.....	32
3.6.3. Milho.....	32
3.7. Proposta de modelo de biodigestor	33
3.8. Parâmetros operacionais do biodigestor	35
3.8.1. Volume diário da mistura.....	35
3.8.2. Tempo de retenção hidráulico.....	36
3.8.3. Volume útil do biodigestor	36
3.8.4. Volume total do biodigestor.....	37
3.9. Estimativa de produção de biofertilizante.....	37
3.9.1. Estimativa de composição nutricional do biofertilizante	38
CAPITULO IV – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	39
4.1. Estimativa de produção do biofertilizante e composição nutricional	40
CAPITULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	43
5.1. Conclusões	43
5.2. Recomendações.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

CAPÍTULO I- INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

A agricultura é uma das principais actividades económicas em Moçambique, gerando grandes volumes de resíduos vegetais após as colheitas. A ausência de práticas eficazes de gestão desses resíduos compromete a qualidade do solo, contribui para a poluição ambiental e representa um desperdício de recursos que poderiam ser reaproveitados de forma benéfica, na própria atividade agrícola (FAO, 2017). No Instituto Agrário de Boane (IAB), observam-se práticas como a queima de resíduos, que além de representar perdas agronômicas significativas, contribuem para a emissão de gases de efeito estufa e degradação ambiental (Barcelos, 2009).

Historicamente, o uso de adubos sempre foi essencial para o aumento da produtividade agrícola. No entanto, os fertilizantes minerais ou sintéticos, amplamente utilizados nas últimas décadas, têm causado impactos negativos ao meio ambiente, como a contaminação de corpos hídricos, a degradação do solo e a redução da biodiversidade microbiana (Oliveira, 2012). Em contrapartida, cresce a demanda por alternativas sustentáveis, de baixo custo e com menor impacto ambiental, entre elas o uso de fertilizantes orgânicos provenientes de resíduos agropecuários e agrícolas.

Diante da crescente necessidade de soluções sustentáveis para o reaproveitamento dos resíduos agrícolas, destaca-se a utilização de biodigestores como alternativa para transformar esses materiais orgânicos em insumos úteis à produção agrícola. Entre os principais produtos gerados por esse processo está o biofertilizante, uma substância orgânica de alto valor agronômico que pode ser utilizada como adubo.

Neste contexto, a pesquisa pretende demonstrar a possibilidade de utilização de resíduos agrícolas para a produção de biofertilizante, promovendo uma solução sustentável para o destino desses resíduos. Além do mais, busca-se propor uma estratégia de gestão eficiente dos resíduos sólidos orgânicos por meio da fermentação em tanques anaeróbicos (biodigestores), uma vez que o acúmulo desses materiais em locais inadequados tem gerado sérias preocupações ambientais. A decomposição descontrolada da matéria orgânica pode resultar na formação de chorume, um líquido escuro e de odor desagradável que infiltra-se no solo, contaminando lençóis freáticos e afetando, negativamente, a qualidade do solo e da água.

O estudo tem como área de pesquisa o Instituto Agrário de Boane (IAB), visto que este é um dos maiores geradores de resíduos sólidos orgânicos, um dos principais poluentes ambientais, que na sua transformação em biofertilizante constitui uma forma de gestão ambientalmente sustentável.

O IAB é uma instituição de ensino técnico profissional que visa dotar os seus estudantes de técnicas para a produção de culturas vegetais e de animais, tendo assim a componente teórica acoplada à actividades práticas, que engloba a produção de diversos tipos de culturas e animais.

Neste contexto, na presente monografia identificam-se os tipos de culturas praticadas no instituto e as respectivas quantidades, de forma a analisar a viabilidade dos resíduos resultantes serem aplicados no projecto de produção de biofertilizante.

Desta forma, a pesquisa encontra-se dividida em três (3) capítulos, primeiro a introdução, onde apresentamos uma abordagem genérica em torno do tema, o problema que leva ao surgimento do estudo de viabilidade para produção de biofertilizante, posteriormente apresentamos a justificativa do estudo, isto é, a pertinência da transformação dos resíduos em biofertilizante. Depois, apresentamos os objectivos gerais e os específicos que servem de directrizes para a pesquisa, as hipóteses que dão supostas respostas ao problema sugerido na pesquisa, a metodologia, que consiste nos procedimentos técnicos e métodos usados para o alcance dos objectivos propostos, bem como a delimitação da própria pesquisa, e por fim na parte preliminar, encontrasse o referencial teórico onde encontra-se uma breve abordagem da revolução industrial e a necessidade de novas fontes de energias e o histórico do biofertilizante.

No segundo capítulo, tem-se a discussão conceptual, onde abordamos questões ligadas a digestão anaeróbia, sobre o biofertilizante, seu processo de formação, sua composição, factores que influenciam na transformação, bem como os métodos usados para a produção do biofertilizante.

No terceiro capítulo, encontra-se a descrição totalista do estudo de campo (Instituto Agrário de Boane), a sua caracterização física, a composição dos campos de cultivo, os tipos de culturas produzidas, as quantidades de resíduos produzidos, bem como a simulação da quantidade de biofertilizante que pode ser produzido no IAB, com os resíduos resultantes da separação da colheita.

No quarto capítulo apresentamos os resultados e a discussão dos mesmos, procurado verificar a viabilidade da aplicação de um projecto de transformação dos resíduos agrícolas em e

biofertilizante e por fim, no quinto e ultimo capítulo encontram-se as conclusões advenientes da pesquisa e as recomendações sobre a forma de gestão dos resíduos agrícolas.

1.2. Problema de pesquisa

1.2.1. Enquadramento do problema de pesquisa

As actividades humanas são responsáveis por grande parte da emissão dos gases existentes na atmosfera, gases esses que danificam a composição natural da atmosfera criando problemas de natureza ambiental, como por exemplo, o aquecimento global, causado pela queima de combustíveis fósseis e os mais diferentes resíduos resultantes das actividades antrópicas, como é o caso dos resíduos agrícolas produzidos no IAB.

Os produtos agrícolas produzidos no IAB têm vários destinos, parte serve de sustento alimentar para o instituto e parte é vendido para as comunidades vizinhas, para de modo a obter valores que possibilitem a compra de outros produtos necessários para o instituto. Entretanto, na produção das variadas culturas são geradas toneladas de resíduos agrícolas que não tomam um destino ambientalmente correcto, que acabam por ser queimados ao ar livre, emitindo gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono, que a longo prazo alteram a composição natural da camada de ozono, culminando em alterações climáticas em escalas locais ou globais.

Além de que, a utilização contínua de fertilizantes químicos como principal fonte de adubação tem provocado impactos negativos no solo e nos recursos hídricos, representando uma preocupação crescente tanto em Moçambique, quanto no cenário global. Esses insumos, embora eficazes a curto prazo, comprometem a saúde do solo, aumentam a dependência externa e elevam os custos de produção.

A preocupação com o uso sustentável dos recursos e a gestão adequada dos resíduos agrícolas tem ganhado destaque nas últimas décadas. Torna-se, portanto, urgente a adoção de uma nova postura por parte do IAB em relação ao aproveitamento de seus resíduos, visando sua transformação em biofertilizante por meio da digestão anaeróbia. Desde a Conferência de Estocolmo, realizada na Suécia em 1972, os países têm buscado estratégias para mitigar os danos ambientais causados por práticas inadequadas, promovendo soluções sustentáveis como a valorização dos resíduos orgânicos na agricultura.

1.3. Pergunta de partida

Desta forma pretende-se responder a seguinte pergunta de partida:

- *Até que ponto um modelo de implantação de um biodigestor para a produção de biofertilizante, tendo como matéria-prima os resíduos agrícolas do Instituto de Agrário de Boane pode ser eficaz?*

1.4. Justificativa da pesquisa

As pesquisas relacionadas à produção de biofertilizantes assumem grande importância em países como Moçambique, uma vez que contribuem para a redução da dependência de fertilizantes químicos importados e dos impactos ambientais associados ao seu uso.

A motivação para a escolha do tema, esta ligada a observação de grandes quantidades de resíduos orgânicos, que após seu descarte não recebem nenhuma aplicabilidade, chegando em alguns casos a serem incinerados, emitindo gases para atmosfera, que prejudicam o meio ambiente. Fora o citado, Moçambique continua a apresentar grandes limitações no que respeita à disponibilidade de alternativas sustentáveis para a fertilização agrícola, mantendo uma forte dependência de fertilizantes químicos importados, cujo custo, frequentemente, ultrapassa o poder de aquisição do cidadão comum e dos pequenos produtores.

O aproveitamento de resíduos no IAB torna-se a uma necessidade de grande relevância devido a existência de grandes quantidades resultantes da produção, que após atingirem o estado de secagem são queimados sem nenhum aproveitamento. Desta forma a transformação dos resíduos agrícolas em biofertilizante, seria uma excelente opção para a gestão dos resíduos agrícolas promovendo melhorias na fertilidade dos solos, na qualidade das culturas produzidas e no desempenho agronómico do Instituto. Contudo, esta prática oferece benefícios pedagógicos aos estudantes e contribui, significativamente, para a preservação ambiental.

Actualmente, o conhecimento e o uso de técnicas e processos de transformação de resíduos em subprodutos da digestão anaeróbia, são vistos como uma grande vantagem, pois possibilita a criação de empresas que além de proporcionar benefícios individuais contribuem no crescimento do País, criando novas fontes de empregos e energias alternativas e a baixo custo, para as comunidades.

1.5.Objectivos

1.5.1. Objectivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em:

- Analisar as formas de aproveitamento de resíduos agrícolas resultantes dos processos de colheita para a produção de biofertilizante.

1.5.2. Objectivos específicos

Com base no objetivo geral estabelecido, definem-se os seguintes objetivos específicos que orientam o desenvolvimento da pesquisa:

- Identificar os principais tipos de biodigestores aplicados na transformação de resíduos orgânicos em biofertilizante (em específico os tipos que se adequam aos resíduos resultantes de actividades agrícolas do IAB);
- Caracterizar e estimar o potencial de produção do biofertilizante dos resíduos agrícolas produzidos no IAB;
- Verificar a viabilidade de produção de biofertilizante no IAB com base nas quantidades e qualidade do resíduo produzido.

1.6. Hipóteses

Em resposta à questão apresentada no problema, a realização do presente trabalho tem como proposta as seguintes hipóteses:

H1: Um modelo de implantação de um biodigestor para a produção de biofertilizante, tendo como matéria-prima os resíduos agrícolas do Instituto Agrário de Boane é viável;

H2: Um modelo de implantação de um biodigestor para a produção de biofertilizante, tendo como matéria-prima os resíduos agrícolas do Instituto Agrário de Boane não é viável.

CAPÍTULO II- REVISÃO DA LITERATURA

Marco conceptual

2.1. Biofertilizante

Silva (2013), define biofertilizante como sendo um composto orgânico, líquido ou sólido, obtido a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, geralmente por meio de biodigestores, e apresenta elevadas concentrações de nutrientes essenciais como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

Trata-se de um efluente resultante do processo de biodigestão que, além de ser isento de agentes patogênicos, possui odor reduzido e pode ser aplicado directamente ao solo ou por fertirrigação, promovendo ganhos significativos na fertilidade dos solos agrícolas (Sordi, 2016). Para além de suprir as necessidades nutricionais das plantas, os biofertilizantes contribuem para a recuperação da estrutura do solo, o aumento da sua capacidade de retenção de água e o equilíbrio da microbiota, posicionando-se como uma alternativa sustentável aos fertilizantes químicos tradicionais (Gomes et al., 2018).

Segundo Marrocos et al., (2012), os biofertilizantes são resultados finais da decomposição de compostos orgânicos, contendo células vivas ou latentes de microrganismos. Esses são preparados a partir da digestão anaeróbia (sistema fechado) ou aeróbia (sistema aberto) de materiais orgânicos e minerais, visando maior disponibilidade de nutrientes e de microrganismos, a composição química do biofertilizante varia conforme o método de preparo, o tempo de decomposição, a população microbiológica, temperatura e o pH do composto, bem como o material que o origina.

2.2. Resíduos Orgânicos

Segundo MICOA (2009), "resíduo orgânico é toda matéria orgânica resultante das actividades do homem, como a indústria, agricultura, pecuária entre outras".

São considerados resíduos agrícolas, aqueles que resultam do processo de separação da colheita, isto entre a matéria que será consumida e a que é descartada. Entretanto, torna-se imperioso salientar que todo resíduo contém uma energia sobre forma de biomassa.

2.3. Biomassa

Segundo Gideão (2012), “biomassa é toda matéria de origem biológica, que pode ser processada para produção de electricidade e essa matéria também pode ser valorizada para fins agrícolas, nomeadamente para a produção de biofertilizante por meio da digestão anaeróbia”.

Para Mortoza (2010), “a biomassa pode ser caracterizada como qualquer matéria orgânica com potencial de conversão, o que inclui não apenas a geração energética, mas também a produção de insumos orgânicos aplicáveis na fertilização agrícola”.

O conceito de Labegalini (2013), defini a biomassa como sendo “qualquer matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser transformada em energia, e tem também produção de biofertilizante como uma das formas de valorização da biomassa, considerando-se que o resíduo final da digestão anaeróbia”.

A biomassa constitui, actualmente, uma das principais fontes de aproveitamento de resíduos orgânicos. Em certas regiões, o uso da biomassa é cada vez mais associado à produção de biofertilizantes, sobretudo a partir de resíduos de origem vegetal ou animal disponíveis localmente.

De acordo com Gideão (2012), “a biomassa é originada a partir de plantas, animais e resíduos urbanos, sendo transformada através de processos como a combustão, gaseificação, fermentação ou produção de substâncias líquidas, esses mesmos processos permitem a obtenção de biofertilizante”. O biofertilizante obtido a partir da biomassa pode ter como origem:

- **Biomassa sólida**- como resíduos florestais e agrícolas (lenha, bagaço de cana), os quais podem ser submetidos a processos de decomposição controlada para gerar fertilizante orgânico;
- **Biomassa líquida**- proveniente de resíduos agrícolas e efluentes orgânicos, utilizada como substrato em biodigestores para a produção de fertilizante líquido;

A composição e a qualidade do biofertilizante obtido através da digestão anaeróbia dependem de vários parâmetros, como o tipo de biodigestor utilizado e o substrato (matéria orgânica) introduzido no sistema. Este subproduto, conhecido como digestato, apresenta uma mistura de nutrientes como azoto (N), fósforo (P), potássio (K) e micronutrientes essenciais, cuja

concentração varia consoante as características da biomassa digerida. A formação do biofertilizante decorre essencialmente em três (3) etapas microbiológicas: a fermentação, a acetogénese e a metanogénese, sendo esta última responsável não apenas pela produção de gases, mas também pela estabilização da matéria orgânica, resultando num efluente final seguro e rico em valor agronómico.

2.3.1. Classificação da Biomassa Quanto a Origem

Segundo Cortez et al. (2008) citado por Oliveira (2011), existem diferentes classificações para a biomassa.

No cômputo geral a classificação é feita a partir de um caso específico estudado o que leva a erros de interpretações (Vassilev, 2010).

A classificação da biomassa é feita de acordo com a origem, diversidade biológica e suas respectivas subclassificações (Oliveira 2011).

O diagrama a seguir (figura 1) mostra a classificação da biomassa destacando tipo de biomassa estudado no presente trabalho.

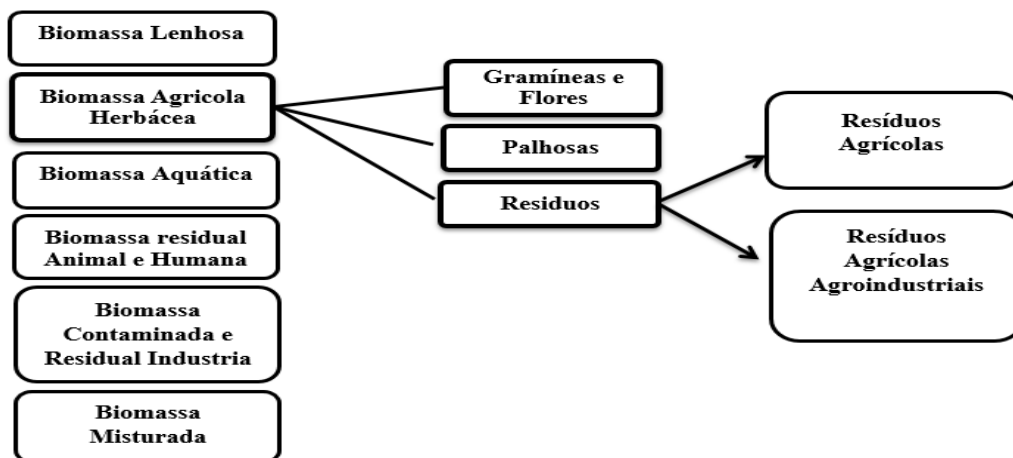


Figura 1: Classificação da Biomassa Quanto a origem.

Fonte: Oliveira (2011).

2.3.2. Classificação da Biomassa Quanto ao uso

De acordo com Goldemberg e Coelho (2004), citados por Oliveira (2011), o uso da biomassa pode ser classificado em dois (2) grandes grupos:

- **Biomassa Tradicional;**
- **Biomassa Moderna;**

No contexto agronômico, a biomassa tradicional refere-se à matéria orgânica proveniente de práticas não sustentáveis, como o desmatamento não controlado ou o uso de técnicas rudimentares de aproveitamento, frequentemente associadas à queima ou descarte indiscriminado de resíduos. Ao passo que, biomassa moderna corresponde à biomassa produzida ou reaproveitada por meios sustentáveis, com aplicação em tecnologias como a digestão anaeróbia, visando a produção de biofertilizantes, entre outros subprodutos.

Karekezi et al. (2004) propõem uma classificação mais detalhada, dividindo o uso da biomassa em três (3) categorias:

- **Biomassa Tradicional;**
- **Biomassa Aprimorada;**
- **Biomassa Moderna;**

A biomassa tradicional é aquela não processada, de baixo custo e baixo rendimento agronômico, frequentemente associada a impactos ambientais negativos, como a degradação do solo e poluição atmosférica. A biomassa aprimorada é submetida a processos de conversão mais eficientes, como o tratamento em sistemas de compostagem ou digestão controlada, reduzindo os impactos ambientais. Já a biomassa moderna, geralmente aplicada em biodigestores, envolve o uso de tecnologias avançadas para transformar resíduos orgânicos em biofertilizantes estáveis, higienizados e com valor agronômico elevado, contribuindo também para a geração de emprego e desenvolvimento rural. No entanto, os custos tecnológicos continuam a ser um desafio à sua adoção em larga escala.

2.3.4. Propriedades dos resíduos verdes

Segundo a FNR (2010), a tabela 2 apresenta os parâmetros típicos dos resíduos verdes utilizados na digestão anaeróbia. Observa-se que, com 12% de matéria seca e uma elevada fração de matéria orgânica (87%), esses resíduos apresentam características favoráveis para a produção de biofertilizante líquido de qualidade. Estima-se que cada tonelada de matéria seca processada possa resultar em aproximadamente 900 a 1.000 litros de biofertilizante líquido, rico em nutrientes como nitrogênio (25 g/kg MS), fósforo (4 g/kg MS). A elevada concentração de matéria orgânica e de nutrientes essenciais, como nitrogênio e fósforo, reforça a viabilidade do uso de substratos agrícolas no presente estudo, uma vez que contribuem para a obtenção de um digestato com potencial agronômico significativo.

Tabela 1: Propriedades dos resíduos verdes

Substrato	MS (%)	MOS (% MS)	C (%)	N (% MS)	P ₂ O ₅ (% MS)	K ₂ O (% MS)	C/N	pH	Produção de biofertilizante (L/t MS)
Resíduos Verdes	12	87	45	2,5	0,4	1,8	18	6,5	900–1.000
Resíduos Agrícolas	15	80–90	40–50	1,8–2,5	0,3–0,5	1,5–2,0	20–25	6,5–7	850–1.000

Fonte: FNR (2010).

2.4. Biofertilizante e Processos de Formação

O biofertilizante é um subproduto resultante da digestão anaeróbia da matéria orgânica, processo biológico e fermentativo cuja principal finalidade é a estabilização da matéria orgânica com a produção de um efluente rico em nutrientes essenciais ao solo, como o azoto, fósforo e potássio (Pecora, 2006).

Karlsson et al (2014), defende que “A matéria orgânica, proveniente da agricultura, tem muito potencial para a produção de biofertilizante. Resíduos de actividades agrícolas e os dejectos de suínos, bovinos, aves, ovinos e caprinos são de grande interesse para a geração de biofertilizante”.

De acordo com Oliveira (2005), “o biofertilizante, enquanto subproduto da biodigestão, corresponde a uma parte significativa do volume da matéria orgânica processada, podendo

representar entre 90 a 96% da carga orgânica inicial, dependendo da eficiência do sistema e do substrato utilizado”.

De acordo com Grychek (1983), citado por Oliveira (2009), o substrato utilizado nos biodigestores deve apresentar um equilíbrio adequado entre os sólidos e a água, de modo a garantir o ambiente ideal para o desenvolvimento das bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia. Estas bactérias são fundamentais para a transformação da matéria orgânica em um fertilizante estável, livre de patógenos e rico em compostos assimiláveis pelas plantas.

Grychek (1983) acrescenta que o tipo de matéria-prima utilizada influencia directamente a qualidade e o valor nutritivo do biofertilizante. Resíduos altamente fibrosos, como o bagaço de cana-de-açúcar ou a casca de arroz, tendem a produzir um digestato de menor valor agronómico.

Por outro lado, resíduos mais ricos em amido, celulose ou hidratos de carbono (como restos de grãos ou gramíneas) resultam num biofertilizante mais concentrado e eficaz para aplicação agrícola.

Quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planeados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, o qual além do seu alto poder calorífico, não produz gases tóxicos durante a queima e é uma óptima alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo que é um excelente biofertilizante (Grychek, 1983).

Segundo Grychek (1983), considere-se o biofertilizante pode ser utilizado directamente no solo ou após algum tipo de maturação ou separação. Este produto não só reduz a necessidade de fertilizantes químicos, como também melhora as propriedades do solo e contribui para uma agricultura mais sustentável.

A tabela 1 apresenta algumas matérias-primas com potencial de produção de biofertilizante quando submetidas ao processo de biodigestão natural ou artificial.

Tabela 2: Matéria- prima com potencial de produção de Biofertilizante.

Tipo de Resíduo	Exemplo
Resíduos orgânicos agrícolas	Restos de culturas, palha, folhas, frutas
Dejectos animais	Fezes de suínos, bovinos, aves e caprinos
Resíduos humanos (esgoto tratado)	Lamas de fossas sépticas e esgoto doméstico
Resíduos de matadouros	Conteúdos estomacais e outros subprodutos
Resíduos agroindustriais	Bagaço, cascas, restos de frutas e legumes

Fonte:(Grychek; Belo, 1983).

2.4.1. Processo de fermentação anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na formação de gases como metano e dióxido de carbono, além de um subproduto líquido e/ou sólido rico em nutrientes, conhecido como digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante (Kelleher et al., 2002).

Segundo Karlsson (2014), o processo passa por quatro principais etapas microbiológicas, que também são fundamentais para a formação e estabilização do biofertilizante:

- **Hidrólise:** nesta etapa, a matéria orgânica complexa presente nos resíduos vegetais (como celulose e proteínas) é quebrada em moléculas menores, como açúcares simples e aminoácidos. A quebra inicial é essencial para liberar compostos que, posteriormente, enriquecem a fração líquida e sólida do digestato.
- **Fermentação:** ou acidogênese, nessa etapa os compostos solúveis gerados na hidrólise são convertidos em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Esses subprodutos afetam diretamente o pH e a composição química do digestato, contribuindo para a solubilização de nutrientes minerais.
- **Acetogênese:** os ácidos formados anteriormente são convertidos em ácido acético, CO₂ e hidrogênio. Esse processo reduz a carga orgânica e contribui para a estabilização da matéria orgânica, tornando o digestato mais seguro e estável para uso agrícola.

- **Metanogênese:** na etapa final, microrganismos metanogênicos transformam o ácido acético e o hidrogênio em metano e dióxido de carbono, que compõem o biogás. A fração da matéria orgânica que não é convertida permanece como resíduo estabilizado no biodigestor, caracterizado por uma elevada concentração de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. Esse material constitui o biofertilizante propriamente dito, que pode ser utilizado na agricultura para melhorar a fertilidade do solo e reduzir a dependência de fertilizantes químicos.

Na figura 2 abaixo tem-se a representação esquemática das etapas do processo de digestão anaeróbica, ou seja, a conversão da matéria orgânica em gases.

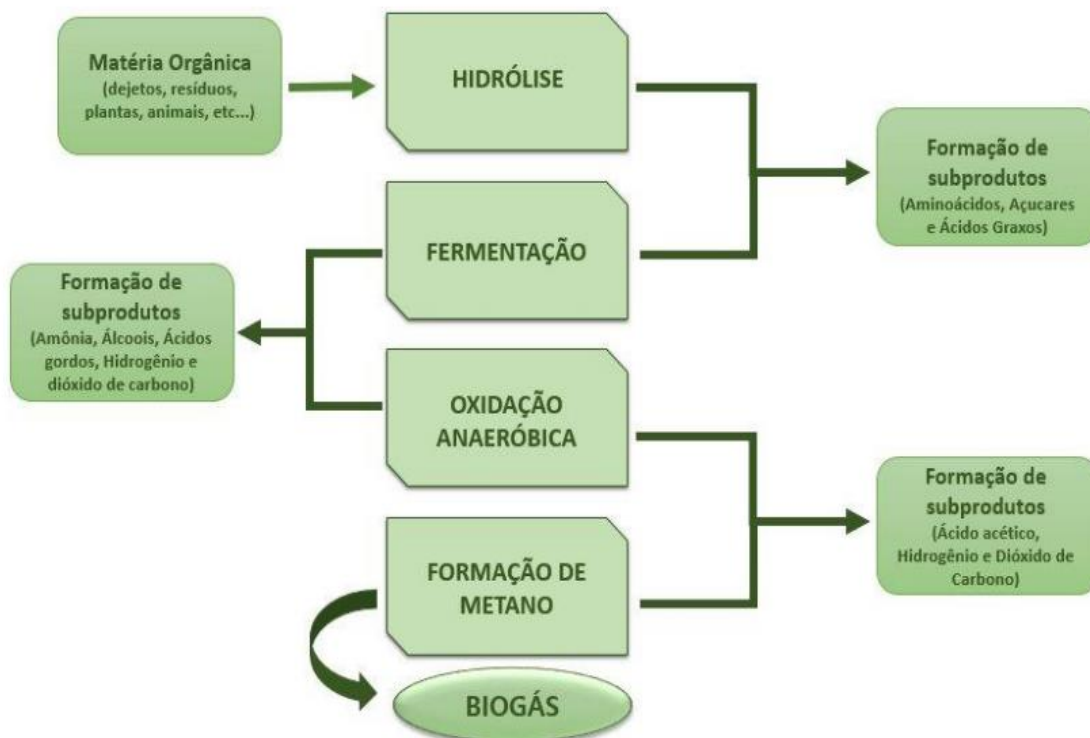


Figura 2: Esquema das etapas da digestão anaeróbia.

Fonte: Manual básico de biogás. KARLSSON (2014).

2.4.2. Factores que influenciam a digestão anaeróbia

De acordo com Junior (2000), citado por Prati (2010), resumem-se abaixo os principais parâmetros da digestão anaeróbica relacionada à geração de biofertilizante:

- **Impermeabilidade do ar:** as bactérias metanogénicas são essencialmente anaeróbicas. A entrada de oxigênio no sistema compromete o processo, levando à decomposição aeróbia da matéria orgânica e à formação de compostos menos estáveis, reduzindo a qualidade do digestato como biofertilizante.
- **Natureza do substrato:** os substratos utilizados no biodigestor devem fornecer os nutrientes essenciais para o crescimento e metabolismo dos microrganismos, incluindo macronutrientes (carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre) e oligoelementos (cálcio, magnésio, potássio, zinco, ferro, cobalto, cobre, molibdênio e manganês). A composição do substrato influencia diretamente a qualidade do biofertilizante, pois determina os teores finais de N, P, K e matéria orgânica presentes no digestato. Concentrações excessivas de certos metais pesados podem inibir a atividade microbiana e comprometer o uso agronômico do produto.
- **Composição dos resíduos:** a proporção de matéria orgânica nos resíduos é determinante para o valor fertilizante do digestato. Resíduos com maior teor de fibras vegetais (celulose e lignina) tendem a gerar biofertilizantes ricos em carbono estabilizado, enquanto resíduos com alta carga nitrogenada (esterco animal) produzem digestatos com maior teor de N disponível. Uma relação carbono/nitrogênio (C/N) adequada (20:1 a 30:1) é essencial para otimizar o processo e garantir um biofertilizante com nutrientes equilibrados e baixo potencial fitotóxico.
- **Teor de água:** a diluição da biomassa (resíduo:água) afeta a fluidez do substrato e a concentração de sólidos totais no digestato. Uma proporção de 1:1 é recomendada para resíduos vegetais, mantendo os sólidos entre 8% e 12%. A seguinte faixa garante a produção de um biofertilizante líquido facilmente aplicável no solo por fertirrigação.
- **Temperatura:** a atividade microbiana é extremamente sensível às variações de temperatura. Para resíduos agrícolas, a faixa mesofílica (30–40 °C) é ideal para obter um biofertilizante de qualidade, com matéria orgânica suficientemente decomposta e rica em nutrientes. Alterações bruscas de temperatura podem comprometer a atividade das bactérias metanogénicas e acidogénicas, impactando negativamente a estabilização do digestato e sua aplicabilidade no solo

- **PH:** o pH do meio influencia diretamente a eficiência da digestão anaeróbia e a qualidade do digestato. Valores ideais situam-se entre 6,8 e 8,0, garantindo a atividade microbiana adequada. Desvios podem comprometer a estabilidade do biofertilizante, levando à formação de ácidos voláteis ou à volatilização de amônia, com perda de nitrogênio.
- **Relacao Carbono/Nitrogenio:** A relação C/N é um parâmetro crítico para a eficiência da digestão anaeróbia e para a qualidade agrônômica do biofertilizante produzido. Valores ideais de C/N situam-se entre 20:1 e 30:1. Relações muito altas (excesso de carbono) resultam em degradação lenta da matéria orgânica, produzindo um digestato com baixo teor de nitrogênio disponível para as plantas. Por outro lado, relações muito baixas (excesso de nitrogênio) podem causar acúmulo de amônia, toxicidade para os microrganismos e volatilização de N, reduzindo o potencial fertilizante do produto. O ajuste da seguinte relação é essencial para garantir um digestato equilibrado e rico em nutrientes.
- **Tempo de retenção hidráulica:** o TRH representa o tempo de permanência do substrato no interior do biodigestor. Para resíduos vegetais e mistos, um TRH de 30 dias é suficiente para a completa decomposição da matéria orgânica e produção de um biofertilizante líquido estabilizado e rico em nutrientes solúveis. TRHs mais curtos podem resultar em digestatos com sólidos não decompostos, enquanto tempos muito longos não trazem ganhos significativos e podem levar à perda de nutrientes voláteis, como o nitrogênio.

Tabela 3: Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos

Referência	Resíduo	Temperatura (°C)	Td (dias)	Nutrientes no digestato (g/kg MS)
Del Borghi et al. (1999)	Resíduos de cozinha triturados	55	12	N: 20–30; P ₂ O ₅ : 5; K ₂ O: 8
Pavan et al. (1999a)	Frutas e verduras	35–56	11–12	N: 15–25; P ₂ O ₅ : 4–6; K ₂ O: 7–10
Xu et al. (2002)	Alimentos	35	16	N: 18; P ₂ O ₅ : 3,5; K ₂ O: 6
Wang et al. (2003)	Alimentos	35	36	N: 22; P ₂ O ₅ : 4; K ₂ O: 9
Bouallagui et al. (2004)	Frutas e verduras	20, 35, 55	20	N: 12–20; P ₂ O ₅ : 3–5; K ₂ O: 5–8
Mtz. Vittutia et al. (1995)	Frutas e verduras	35	4,5–18	N: 17; P ₂ O ₅ : 3; K ₂ O: 6

Fonte: Barcelos (2009)

A Tabela 3 apresenta dados de diferentes estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos vegetais e alimentares, destacando parâmetros operacionais e a composição final do digestato utilizado como biofertilizante. Observa-se que resíduos ricos em matéria orgânica, como frutas, verduras e resíduos de cozinha, resultam em digestatos com concentrações relevantes de nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O), além de elevados teores de matéria orgânica estabilizada. Esses atributos reforçam o potencial agronômico do biofertilizante gerado e validam o uso de substratos agrícolas no presente estudo, considerando as semelhanças com os resíduos disponíveis no IAB.

2.4.4. Composição do biofertilizante

Segundo Gomes et al. (2018), citado por Silva e Oliveira (2014), a composição típica do biofertilizante líquido é formada principalmente por matéria orgânica estabilizada e nutrientes essenciais, destacando-se o nitrogênio, fósforo e potássio, além de micronutrientes em menores concentrações. Estes componentes são provenientes da decomposição controlada de resíduos orgânicos no interior do biodigestor, resultando em um produto com elevado potencial agronômico.

A qualidade agronômica do biofertilizante está diretamente relacionada à presença de macronutrientes (N, P_2O_5 , K_2O) e de micronutrientes como cálcio, magnésio, ferro, zinco e manganês. Embora esses elementos estejam presentes em proporções menores, eles desempenham papéis fundamentais no metabolismo vegetal e na resistência das plantas a estresses ambientais (Gomes et al., 2018).

Assim como a composição do biogás varia conforme o substrato, a constituição do biofertilizante também depende da natureza dos resíduos processados e das condições de operação. A Tabela 4 apresenta uma composição típica de biofertilizante líquido obtido a partir de resíduos vegetais.

Tabela 4: Percentagem de gases no biofertilizante

Componentes	Faixa típica (%)
--------------------	-------------------------

Matéria orgânica total	10 – 15
Nitrogênio total (N)	0,2 – 0,4
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,05 – 0,2
Potássio (K ₂ O)	0,3 – 0,5
Relação C/N	30 – 50
pH	7,5 – 8,5

Fonte: Adaptado de Silva & Oliveira (2014).

As seguintes características tornam o biofertilizante adequado para a adubação orgânica de culturas diversas, especialmente hortícolas, milho, feijão e outras culturas com exigência nutricional moderada. O teor de matéria orgânica contribui para a melhoria da estrutura e da capacidade de retenção de água no solo, enquanto o pH levemente alcalino pode corrigir solos ácidos. A elevada humidade e a relação C/N entre 30 e 50 indicam que o digestato possui liberação lenta de nutrientes, funcionando como fertilizante de efeito residual (Gomes et al., 2018).

Durante a digestão anaeróbia, além da formação de metano e dióxido de carbono, também são produzidos gases secundários como o gás sulfídrico (H₂S), que, embora indesejado em processos energéticos, tem efeito directo sobre a composição química do biofertilizante. Segundo Oliveira (2009), esse gás pode ser parcialmente incorporado ao digestato na forma de enxofre (S), nutriente essencial para as plantas, desde que presente em concentrações controladas.

O dióxido de carbono (CO₂), principal gás co-produto junto ao metano, influencia o pH do digestato, favorecendo uma leve alcalinidade, característica comum dos biofertilizantes e benéfica para a correção de solos ácidos (Magalhães, 1986).

Portanto, embora o biogás não seja o foco deste estudo, seus componentes exercem papel relevante na qualidade agrônômica do digestato, afetando tanto sua composição nutricional quanto sua estabilidade química e microbiológica.

2.4.6. Aplicação do digestato

Segundo Simon (2020), é possível identificar as principais formas de tratamento e aproveitamento do biofertilizante (digestato) após sua saída do biodigestor:

- **Aplicação directa do digestato completo:** após a saída do reator, o digestato pode ser aplicado diretamente no solo, sem qualquer separação ou tratamento adicional. A seguinte prática é comum em áreas próximas ao local de produção e é indicada para solos com baixa fertilidade, pois o material ainda contém grande quantidade de água e nutrientes disponíveis.
- **Digestato seco (após secagem):** o digestato também pode ser submetido a processos de secagem, resultando em um material mais concentrado e estável. Após a secagem, o digestato seco pode ser aplicado em lavouras como fertilizante orgânico sólido, facilitando o transporte e armazenamento.
- **Separação sólido-líquido do digestato:** após sair do biodigestor, o digestato pode ser submetido a um processo de separação físico-mecânica, que divide o material em fração líquida e fração sólida. A fração líquida, por sua vez, pode ser diretamente aplicada na agricultura ou passar por etapas de tratamento, como remoção ou recuperação de nutrientes, tratamento biológico para estabilização ou evaporação para redução de volume. Já a fração sólida pode ser utilizada na adubação do solo, submetida à secagem para facilitar o transporte ou ainda encaminhada para processos de compostagem, com o objetivo de melhorar sua qualidade agronômica.

As mesmas formas estão organizadas em função do estado físico do digestato completo, sólido ou líquido e cada fração pode ser utilizada ou tratada de diferentes maneiras, dependendo das necessidades agronômicas e ambientais tal como ilustra a figura 3.

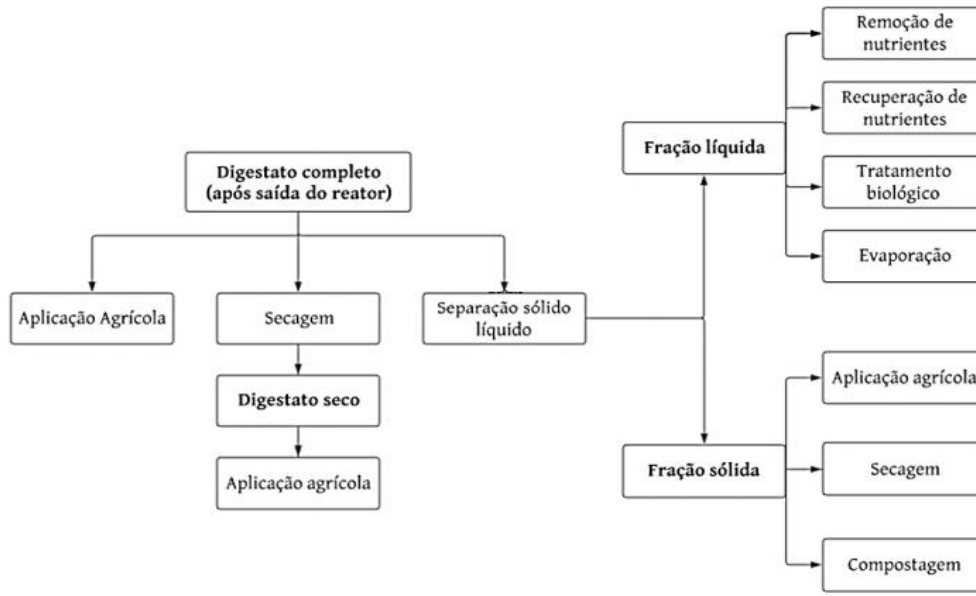


Figura 3: Aplicações do digestato.

Fonte: Simon (2020).

2.4.7. Vantagens do digestato

O digestato, resultante da digestão anaeróbia, tem sido cada vez mais valorizado como o produto principal, dada a sua relevância para a agricultura sustentável e a gestão eficiente dos recursos naturais. A sua aplicação permite múltiplos benefícios ao nível agronómico, ambiental e económico, enquanto o biogás é considerado um co-produto com potencial energético adicional (Bachmann et al., 2023).

Segundo Bachmann et al. (2023), destacam-se os seguintes vantagens associadas ao uso do digestato:

- **Agronómicas**- rico em nutrientes (N, P, K) e matéria orgânica estabilizada; melhora a estrutura física e biológica do solo; aumenta a capacidade de retenção de água e reduz a necessidade de fertilizantes químicos.
- **Ambientais**- contribui para a mitigação das emissões de gases com efeito de estufa (GEE); permite o sequestro de carbono no solo; diminui a poluição associada à disposição inadequada de resíduos orgânicos.
- **Económicas**- reduz os custos de produção agrícola; potencial para comercialização como fertilizante orgânico líquido ou sólido; gera receitas adicionais para produtores.

2.5. Biogás

Durante o processo de digestão anaeróbia no interior do biodigestor, a biomassa orgânica é decomposta por microrganismos metanogênicos, resultando na formação de biogás e digestato. O biogás é uma mistura de gases combustíveis, composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas quantidades de outros gases como hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), vapor d'água e gás sulfídrico (H_2S), (Cassini et al 2014).

Resíduos agrícolas, como restos de culturas, folhas, palhas e bagaços, podem ser tratados com sucesso em biodigestores, produzindo biogás e biofertilizante. Apesar de apresentarem um menor poder calorífico devido à sua menor concentração de matéria orgânica facilmente degradável, esses resíduos ainda contribuem para a redução do impacto ambiental (De Bona, *et al*, 2017).

A produção de biogás depende, directamente, das condições de manutenção e operação do biodigestor e do resíduo. Além do mais, para sua utilização na propriedade rural, é recomendável que haja um planeamento da demanda dessa fonte de energia, pois dessa forma o biogás pode ser utilizado de maneira racional, levando em conta critérios de demanda e produção (De Bona, *et al*, 2017).

A composição do biogás pode variar por vários factores (temperatura, tempo de retenção e relação C/N). Na tabela 5, apresenta-se uma faixa típica da composição desses elementos:

Tabela 5: Composição típica do biogás.

Gases	Percentagem (%)
Metano (CH_4)	50 – 70
Gás Carbónico CO_2	30 – 40
Nitrogénio N_2	0 – 10
Hidrogénio H_2	0 – 5
Oxigénio O_2	0 – 1
Gás Sulfídrico H_2S	0 – 1
Vapor d'água	0,3

Fonte: Adaptado de Silva & Oliveira (2014).

2.6. Biodigestores

De acordo com PNUD (2010), citado por Silva e Oliveira (2014), o biodigestor é uma câmara fechada que fornece condições adequadas para a fermentação da matéria orgânica realizada por bactérias metanogênicas. Durante esse processo anaeróbio, além da produção de biogás, ocorre a formação do digestato líquido, conhecido como biofertilizante, rico em nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio.

Gonçalves et.al (2009) acrescenta dizendo que o biodigestor compõe-se, basicamente, de uma câmara fechada na qual uma biomassa (em geral detritos de plantas e animais) é fermentada anaerobiamente, isto é, sem a presença de ar. Como resultado desta fermentação ocorre à liberação de biogás e a produção de biofertilizante.

É possível, portanto, definir o biodigestor como um aparelho destinado a conter a biomassa e seus produtos, o biogás e o biofertilizante. Como definiu Barreira (2003), citado por Gonçalves et al. (2009), “o biodigestor, como toda grande ideia, é genial por sua simplicidade”. Tal aparelho, contudo, não produz diretamente o biogás e o biofertilizante, uma vez que sua função é fornecer as condições propícias para que um grupo especial de bactérias, as metanogênicas, degrade o material orgânico, com a conseqüente liberação do gás metano e a formação do digestato rico em nutrientes.

Existem vários tipos de biodigestor, mas, quase todos são compostos, basicamente tal como apresenta a figura 4:

- Um recipiente (tanque) para abrigar e permitir a digestão da biomassa;
- O gasómetro (campânula), para armazenar o biogás. Como a figura abaixo mostra:

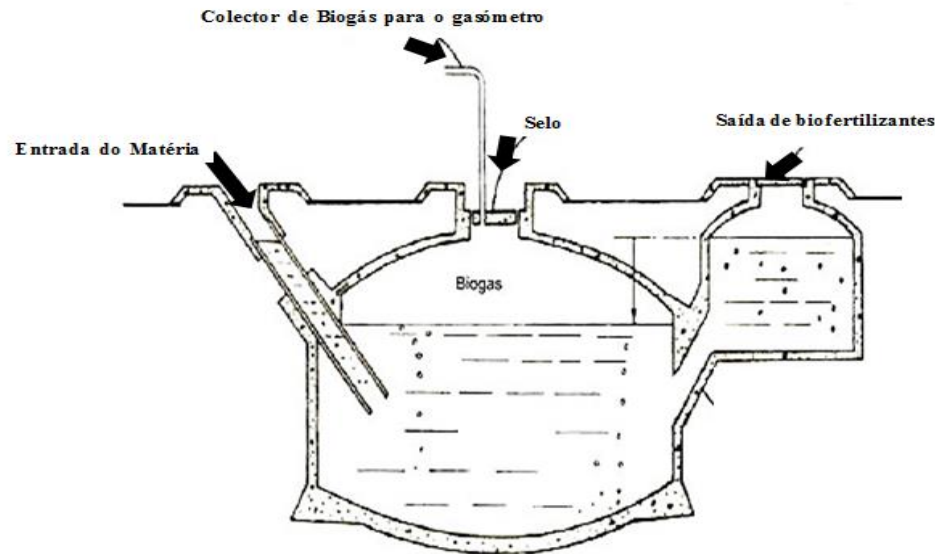


Figura 4: Composição do Biodigestor

Fonte: Viera (2012).

Ao término do processo de digestão da matéria orgânica, permanece o resíduo chamado biofertilizante, que deve ser retirado regularmente para o bom funcionamento do biodigestor, e após um simples tratamento, pode ser embalado e comercializado como fertilizante e pesticida para produções orgânicas (Silva e Oliveira, 2014).

A forma de abastecimento dos biodigestores os classifica em batelada, em que se armazena a máxima capacidade de carga, substituída somente após a digestão completa do material orgânico; e contínuos, construídos para que o abastecimento de carga seja diário, existindo uma saída para o material processado com volume de descarga proporcional ao de carga. Os biodigestores utilizam todo tipo de material que se decompõe sob ação das bactérias anaeróbicas, mas os resíduos animais são considerados o melhor alimento para ele, por serem naturalmente carregados de bactérias anaeróbicas (Silva e Oliveira, 2014).

De acordo com Gonçalves et. al (2009) em relação ao abastecimento de biomassa, o biodigestor pode ser classificado como contínuo abastecimento diário de biomassa, com descarga proporcional à entrada de biomassa, ou intermitente, quando utiliza sua capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até a complexa biodigestão. Então, retiram-se os restos da digestão e faz-se nova recarga. O modelo de abastecimento intermitente é mais indicado quando da utilização de

materiais orgânicos de decomposição lenta e com longo período de produção, como no caso de palha ou forragem misturada a dejectos animais.

2.6.1 Modelos de Biodigestores

Segundo Saravanan & Sreekrishnan (2005), citado por Balmant (2010), Com o aumento do interesse na biodigestão, muito biodigestor foram propostos e a tecnologia de biodigestores avançou, tanto no campo como no tratamento sanitário. Pode-se dividir os biodigestores em dois grandes grupos:

- Biodigestores de uso agrícola;
- Biodigestores de uso sanitário.

É importante ressaltar que os biodigestores de uso sanitário podem ser utilizados no campo, bem como nas indústrias que precisam tratar seus dejectos industriais, principalmente em indústrias de alimentos (Balmant,2010).

Entre os biodigestores de uso agrícola, pode-se destacar o modelo indiano e o modelo chinês. Esses biodigestores talvez sejam os mais antigos que existem. Sua forma de operação é simples, bem como sua construção. Nas figuras 5 e 6 temos os diagramas básicos de como funcionam o biodigestor chinês e indiano (Balmant,2010).

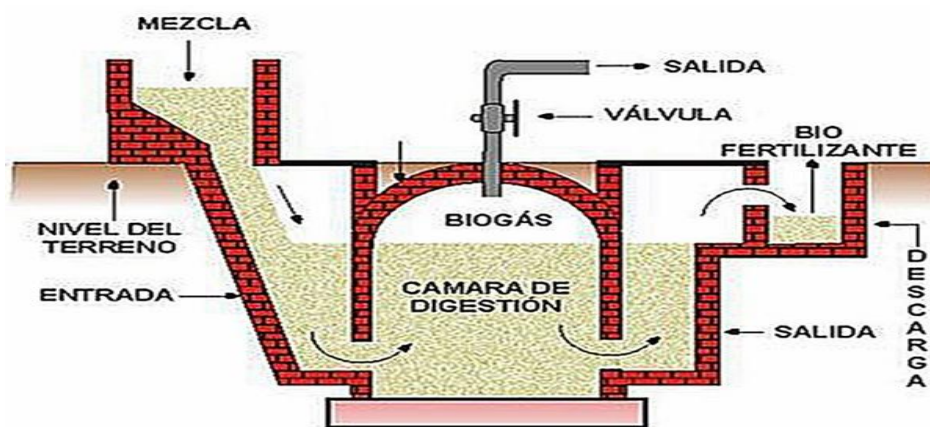


Figura 5: Biodigestor do modelo chinês

Fonte: Balmant (2010).

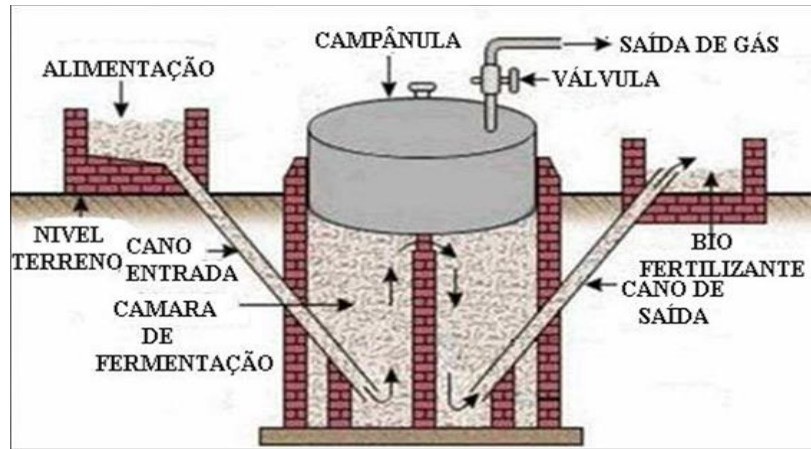


Figura 6: Biodigestor do modelo indiano.

Fonte: Balmant (2010).

No modelo chinês e indiano de biodigestores a produção de biofertilizantes é a mesma, sendo que a única diferença está no facto de que o modelo indiano apresenta melhor sistema contra a fuga de gás, o que aumenta a chance de utilização do gás na produção de energia (Barreira, 2003).

As diferenças entre o modelo indiano e chinês de biodigestores não são expressivas, sendo que o maior diferencial está relacionado com a cúpula. No modelo chinês a cúpula é móvel e pode ser feita de metal, fibra de vidro, plástico resistente a corrosão ou qualquer outro tipo de material (Barreira, 2003).

2.6.1.1 Biodigestor Modelo Marinha Brasileira

De acordo com Souto (2005), citado por Oliveira (2009), o modelo de biodigestor desenvolvido pela marinha brasileira, apresenta uma base quadrangular, com paredes de alvenaria revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona preta também impermeável. É um modelo mais raso e longo, o que lhe garante uma maior produtividade de gás por massa fermentada.

Este modelo é o mais indicado para projectos industriais e agro-industriais, por ser versátil ao uso de diferentes resíduos orgânicos e ser capaz de armazenar grande quantidade de resíduos passíveis de sofrer fermentação anaeróbica, produzindo assim grande quantidade de biogás e estabilizando os dejectos que podem ser utilizados como biofertilizantes (Oliveira, 2006).

O modelo marinha brasileira, detém uma série de vantagens comparado aos outros modelos, como por exemplo o modelo indiano e chinês. Uma das vantagens é a manta impermeável que foi aperfeiçoada, passando a ser feita com policloreto de vinila (PVC), o que deixa o modelo com menor custo e maior facilidade de instalação, além de apresentar maior resistência a corrosão provocada pela água e pelo ácido sulfídrico e com a possibilidade também de ser utilizado em grandes e pequenos projectos agro-indústrias (Oliveira, 2009).

Numa comparação directa entre o modelo chinês e indiano com o da marinha brasileira, verifica-se que a marinha brasileira tem a vantagem de receber maiores quantidades de resíduos que o modelo indiano e, entre o modelo chinês e a marinha brasileira a vantagem deste modelo é que o chinês sofre rachaduras na sua estrutura em alguns tipos de solo (Oliveira, 2009). A figura 7 representa um modelo de biodigestor da marinha, esquematizado e implementado, respectivamente.

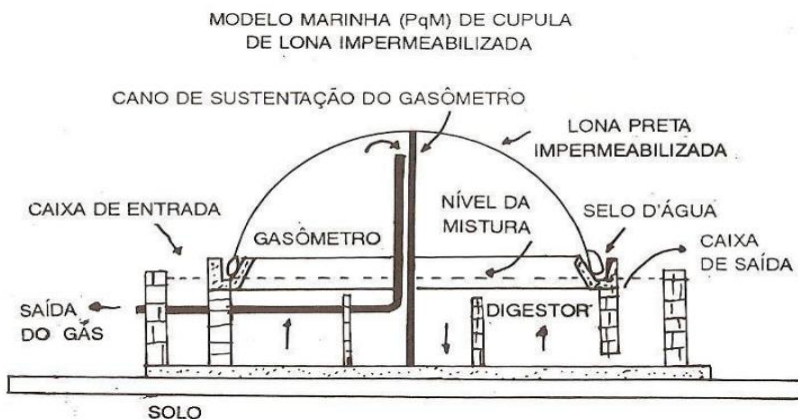


Figura 7: Biodigestor do modelo da marinha brasileira.

Fonte: Oliveira (2009)

CAPÍTULO III- METODOLOGIA

A realização de qualquer pesquisa pressupõe a estruturação de um método a fim de guiar os passos do pesquisador e possibilitar a sua replicação quando conveniente. Portanto, para a prossecução deste estudo foram empregues diversos métodos e técnicas, cuja escolha deveu-se à natureza, características e objectivos do próprio estudo.

3.1. Tipo de estudo e desenho da pesquisa

Quanto à classificação da pesquisa, adopta-se para esta pesquisa cinco (5) classificações, das quais, destacam-se: quanto à natureza, quanto à abordagem e quanto aos objectivos, quanto aos procedimentos, quanto aos procedimentos técnicos, conforme as abordagens que seguem.

3.1.1. Quanto a natureza da pesquisa

Quanto à natureza, trata-se de é uma pesquisa aplicada, de acordo com Lundin (2016), a pesquisa aplicada tem como objectivo gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas reais e específicos, envolve, por isso, verdades e interesses que são típicos de determinadas localidades. Do conhecimento gerado, esta pesquisa permitirá a identificação e proposta de soluções de produção de biofertilizante no IAB, bem como na gestão de resíduos agrícolas

3.1.2. Quanto a forma de abordagem do problema

Quanto à abordagem recorreremos a duas formas, nomeadamente, a forma qualitativa e a quantitativa. Ora, de acordo com Lundin (2016) este tipo de pesquisa considera uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, e ainda tudo pode ser quantificável, o que impele a traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. A abordagem qualitativa procurará analisar a possibilidade de implementação de um biodigestor para a produção de biofertilizante, tendo como matéria-prima os resíduos do Instituto Agrário de Boane (IAB) e com a abordagem quantitativa será transformada as opiniões e informações em números possibilitando assim a sua classificação e análise. Com base nesta pesquisa, usar-se-á os instrumentos estatísticos tanto na coleta como no tratamento e interpretação dos dados, garantindo-se uma medição e qualificação dos dados coletados através de guia de estudo de campo.

3.1.3. Quanto ao objectivo da pesquisa

Quanto ao objectivo a pesquisa é descritiva pois descreve as quantidades e tipos de resíduos produzidos no Instituto Agrário de Boane e a viabilidade de transformação dos mesmos em biofertilizante, e experimental no sentido técnico-simulativo, pois envolve a manipulação de variáveis por meio de fórmulas e modelos matemáticos, conforme defendido por Gil (2010), que reconhece experimentos simulados como parte da pesquisa experimental, especialmente em estudos de engenharia e ciências aplicadas.

3.2. Técnicas e instrumentos de recolha de dados

Para a materialização da pesquisa, serão usadas os seguintes métodos: método bibliográfico, estudo de caso, método documental, trabalho de campo, guião de estudo de campo e observação directa.

3.2.1. Pesquisa bibliográfica

De acordo com Gil (2010:50), "a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos". Com este tipo de pesquisa iremos basear-se na leitura de referências teóricas já publicadas tais como obras científicas, documentos que versam sobre a Gestão de Resíduos Sólidos, com um reconhecimento científico, para fundamentação do problema identificado.

3.2.2. Pesquisa documental

Para Oliveira (2011:87), "a pesquisa documental, consiste na colecta de dados em fontes primárias, como documentos escritos ou não, pertencentes a arquivos públicos e fontes estatísticas como documentos de funcionamento (relatórios, decretos) relacionados com o tema em análise."

3.2.3. Observação directa

Foi usada a observação directa como instrumento de recolha de dados, que é entendida por Marconi e Lakatos (2003), como um instrumento que consiste em observar, inocentemente, os factos após uma viagem exploratória ao campo de estudo. A observação também obriga o pesquisador a ter um contacto mais directo com a realidade. Para captar informações, ir-se-á ao local de estudo, onde se observará os diferentes cenários.

3.3. Localização da área de estudo

O Instituto Agrário de Boane localiza-se no distrito de Boane, situado na província de Maputo, na Zona Sul de Moçambique. E a sua sede é a vila de Boane.

O distrito faz fronteira, a norte com o distrito de Moamba, a oeste e sudoeste com o distrito de Namaacha, a sul e sudeste com o distrito de Matutuíne e a leste com o município da Matola.

O distrito de Boane tem uma superfície de 820 km² e uma população recenseada em 2007 de 102 457 habitantes, o que corresponde a uma densidade populacional de 124,9 habitantes/km² e corresponde a um aumento de 80,7% em relação aos 56 703 habitantes registados no censo de 1997. O mapa abaixo mostra o distrito de boane evidenciando com uma etiqueta o IAB.

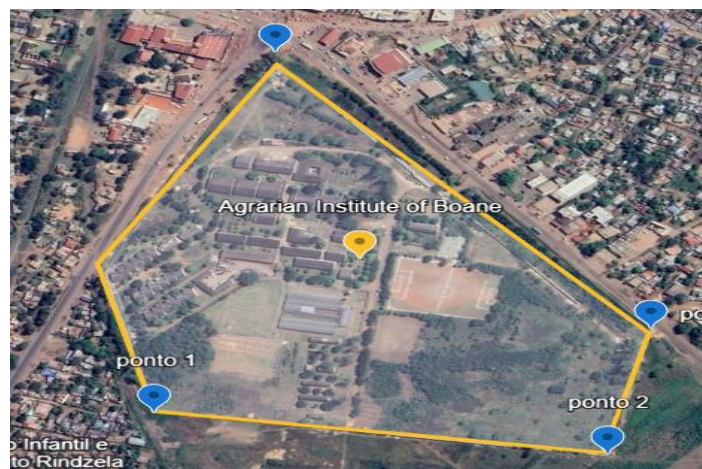


Figura 8: Mapa de localização do IAB.

Fonte: Google earth 15/08/2025 10:20

3.4. Caracterização da área de estudo

O Instituto Agrário de Boane detém um grande potencial de biomassa, devido a produtividade de massa vegetal, pois localiza-se em uma região com clima tropical húmido, com uma taxa de incidência de precipitações considerável, o que influi no sucesso de produção do instituto.

Após a produção atingir a fase de maturação para a colheita, os resíduos resultantes da separação da produção no IAB, uma parte é reaproveitado para a alimentação de animais pertencentes a criação do instituto, como as vacas e porcos, outra parte dos resíduos são usados para adubar os campos sem nenhum tratamento primário, com vista a obter a compostagem.

A dimensão total dos campos de produção do IAB, segundo o Director de produção, que trabalha no instituto já a 15 anos é de 22 hectares onde são cultivados as seguintes tipologias e quantidades de culturas por espaço representado no gráfico 1:

- 3 - Hectares de feijão boer;
- 11 - Hectares de Milho;
- 1,5 - Hectares de Mandioca;
- 1,5 - Hectares de Tomate;
- 1,5 - Hectares de Batata Doce;
- 600 - m^2 Bananal
- 750 - m^2 Hectares de Repolho;
- 750 - m^2 Hectares Feijão Verde;
- 750 - m^2 Hectares Pepino.

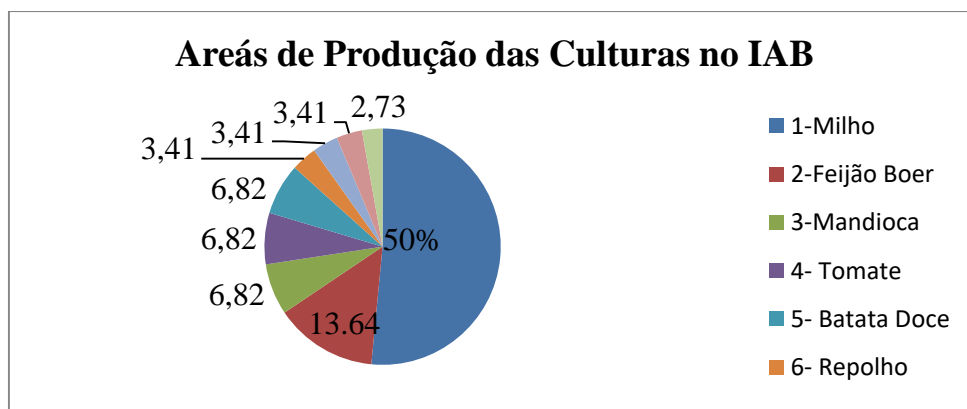


Figura 9: Gráfico de percentagem das áreas de produção por cultura no IAB.

Fonte: Adaptado pela autora.

3.5. Espaçamento e Densidade

Segundo Wellinger, (1984)., o espaçamento é distância entre linhas e a densidade é a distância entre plantas ou número de plantas na linha que vai ter menor competição, com maior produtividade. O espaçamento e a densidade definem o padrão da cultura, a população de plantas ou número de plantas/área tal como apresenta a tabela 6.

Tabela 6: Densidade populacional de indivíduos culturais por área no IAB.

Nr.	Cultura	Área de produção por unidades	Espaçamento	Densidade Plantas /ha	Densidade Total
1	Milho	11ha	1,00 x 0,20 m	50.000	550.000
2	Feijão Boer	3ha	0,50 x 12-13 plantas/m	250.000	750.000
3	Feijão-verde	750 m ²	0,50 x 12-13 plantas/m	250.000	18.750
4	Mandioca	1.5ha	1,00 x 0,20 m	50.000	75.000
5	Batata-doce	1.5 há	1,00 x 0,20 m	50.000	75.000
6	Bananal	600 m ²	1,00 x 0,80 m	12.500	750
7	Repolho	750 m ²	1,00 × 0,05m	150.000	11.250
8	Tomate	1.5ha	1,00 × 0,05m	150.000	225.000
9	Pepino	750 m ²	1,00 × 0,05m	150.000	11.250
Total					1.642.000

Fonte: Director de produção do IAB (2024).

Tabela 7: Relação, resíduo e produção por tipo de cultura no IAB.

Nr.	Cultura	Produto	Tipo	Área de produção por unidades
1	Milho	Grão	Folhas e palha	11ha
2	Feijão Boer	Grão	Ramos e folhas	3ha
3	Feijão-verde	Grão	Ramos e folhas	750 m ²
4	Mandioca	Raiz	folhas	1.5ha
5	Batata-doce	Raiz	folhas	1.5 há
6	Bananal	Banana	folhas	600 m ²
7	Repolho	Repolho	casca	750 m ²
8	Tomate	Tomate	Rama e folhas	1.5ha
9	Pepino	Pepino	Folhas	750 m ²

Fonte: Director de produção do IAB (2024).

A produção do biofertilizante, não limita a produção de nenhum tipo de cultura, sendo que toda massa orgânica verde possui em sua composição a matéria necessária para a produção do biofertilizante, com a sua produção no IAB, não colocar-se-á em risco a produção de alimentos. Isso se deve a razão do biofertilizante ser resultante da decomposição de resíduos agrícolas, bem como de excrementos humanos e animais (Barreira, 2003).

Para determinar a quantidade de resíduos gerados nos campos do IAB, foram utilizados dados fornecidos directamente pela instituição, com base em registos de produção e observações de campo.

3.6. Padrões de Produção dos resíduos por algumas culturas

3.6.1. Banana

A produção da banana, resulta em folhas como resíduo da colheita, onde estes mesmos resíduos atingem cerca 85% do peso dos frutos. Informações não publicadas, indicam que a produção de folhas, ao longo de todo o ciclo cultural de uma bananeira (e não apenas como resto da colheita), atinge cerca de 37,5 kg, tanto para cachos de 25 kg, como para cachos de 40 kg.

O pseudocaule, como parte do resíduo, chega a pesar entre 10 e 50 kg e fornece 1% de fibra e estopa. O pseudocaule como Resíduo resultante da colheita, chega a corresponder cerca de 185% do peso dos frutos Wellinger, (1984).

3.6.2. Mandioca

Um plantio denso da mandioca forneceria maior quantidade de resíduos, referindo-se à parte da planta que está acima do solo, composta de hastes e folhas. A produção da mandioca atinge até 32 t/há, e a de massa residual chega até 16.19 % do produzido em um hectare.

3.6.3. Milho

De acordo com a FAO (2017) a palha e o sabugo são importantes subprodutos da indústria do milho. A palha é obtida ainda durante a colheita e na maioria dos casos não possui uma utilização definida, tornando-se um resíduo. Já o sabugo, parte interna e mais densa do milho, é o resíduo gerado após o milho ser debulhado e geralmente é usado para ração animal (Santos, 2014). Para cada tonelada de milho processado são gerados, aproximadamente, 180 kg de sabugo e 700 kg de palha (Horst, 2013).

Segundo Viera (2012) a produção de resíduos de milho para cada tonelada colhida é de 2,3 toneladas. Entretanto, a utilização do milho como biomassa para geração de energia ainda é incipiente, pois o mesmo só pode ser utilizado quando a colheita do milho for a espiga para utilização em indústrias de processamento de milho verde ou para produção de sementes de milho.

Tabela 8: Relação área de plantação, produção e quantidade de resíduos no IAB.

Nr.	Cultura	Área de Produção	Produtividade (ton/ha)	Colheita Total (ton)	Resíduo (ton/ha)	Quantidade Total de Resíduos (ton)
1	Milho	11 ha	46,27	508,97	0,88	40,72
2	Feijão Boer	3 ha	644,00	1,93	352,00	1.056,00
3	Feijão-verde	0,075 m ²	—	49,00	—	26,40
4	Mandioca	1,5 ha	32,00	48,00	5,18	7,77
5	Batata-doce	1,5 ha	15,03	22,55	3,16	5,42
6	Bananal	0,06 m ²	—	243,75	50.625	50.625,00
7	Repolho	0,075 m ²	—	164,34	—	1,89
8	Tomate	1,5 ha	84,40	126,75	1,69	2,54
9	Pepino	0,075 m ²	—	193,19	—	1,23
	Total					137,65

Fonte: Director de produção do IAB (2024).

3.7. Proposta de modelo de biodigestor

A escolha do tipo do biodigestor depende basicamente das condições do local onde será implantado, tipo de substrato, experiência do construtor e principalmente relação custo benefício. O modelo de biodigestor escolhido foi o da Marinha Brasileira de fluxo contínuo devido à sua adequação a ambientes rurais e à capacidade de operar com cargas diárias médias de resíduos. Considerando que o Instituto Agrário de Boane gera aproximadamente 377 kg/dia, este modelo se mostra, tecnicamente, viável e compatível com a realidade do instituto, oferecendo simplicidade construtiva, operação contínua e custo acessível. A figura 10 ilustra um modelo de marinha brasileira implementado.



Figura 10: Sistema de biodigestor do modelo da marinha brasileira implementado.

Fonte: Konrad, (2014)

A tabela 9 a seguir apresenta os elementos estruturais e funcionais do sistema de biodigestão anaeróbia proposto, com destaque para os pontos que requerem ajustes no projeto físico do biodigestor. Com as seguintes modificações visam melhorar a eficiência operacional, facilitar o manejo do substrato e otimizar a coleta do biofertilizante, de acordo com as condições do Instituto Agrário de Boane.

Tabela 9: Adaptação do modelo da Marinha Brasileira para o IAB.

Aspecto	Modelo Marinha Brasileira	Adaptação proposta para o IAB
Substrato	Estrume animal diluído em água	Resíduos agrícolas triturados manualmente e misturados com água
Entrada do substrato	Tubo simples	Tubo com funil improvisado para facilitar a alimentação
Saída do digestato	Tubo de descarga direta	Tambor para decantação natural do digestato (sem peneira/crivo)
Agitação	Ausente; ocorre pelo movimento do gasómetro	Agitação ocasional com vara de madeira

Controlo térmico	Dependente da temperatura ambiente	Cobertura com lona preta ou palha para melhorar retenção de calor
Aproveitamento do biogás	Opcional: fogões, aquecimento ou energia elétrica	Uso experimental em fogareiro para fins educativos

Fonte: Adaptado pela autora

3.8. Parâmetros operacionais do biodigestor

Nesta seção são apresentadas as fórmulas utilizadas para estimar a produção de biofertilizante, com base na metodologia de Barcelos (2009) e Gomes et al. (2018).

Antes do desenvolvimento dos cálculos, define-se o processo de dimensionamento do biodigestor como a etapa em que se determina, de forma teórica, os parâmetros técnicos necessários para a elaboração do sistema de biodigestão anaeróbia, com foco na transformação de resíduos orgânicos em biofertilizante (Barcelos, 2009).

A seguinte etapa envolve o cálculo da carga diária de resíduos agrícolas frescos e a definição do volume útil do biodigestor, a partir da estimativa do peso total da mistura diária (PTMd) e do tempo de retenção hidráulica (TRH) adequado ao substrato vegetal.

3.8.1. Volume diário da mistura

Converte a massa da mistura diária em volume útil, necessário para o dimensionamento do biodigestor, pode ser determinado pela equação (1).

$$V_d = \frac{PTMd}{\rho a}$$

Equação (1)

Onde:

Vd = Volume diário da mistura (m³/dia)

PTMd = Massa total da mistura diária (kg);

pa = densidade da água (1000kg/m³)

3.8.2. Tempo de retenção hidráulico

O Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) é o período necessário para que ocorra a digestão anaeróbia da mistura orgânica, permitindo a estabilização da matéria e a obtenção de um biofertilizante com boa qualidade agrônômica. Esse tempo define o ponto de maior eficiência do processo, em que o digestato apresenta melhores características para uso agrícola. Segundo Magalhães (1986), o TRH é determinado, em sistemas contínuos, pela relação entre o volume do biodigestor e a carga diária de resíduos introduzida. Adotou-se um TRH de 30 dias, conforme recomendado por Pinto (2000) e Barcelos (2009), que consideram que esse tempo assegura a devida transformação dos resíduos orgânicos em um biofertilizante estável, livre de odores e com maior disponibilidade de nutrientes para as plantas.

3.8.3. Volume útil do biodigestor

Para este estudo, considerou-se a média de geração diária de resíduos vegetais no Instituto Agrário de Boane, e adotou-se uma diluição de 1:1 com água, conforme recomendado por Gomes et al. (2018), garantindo que essa mistura permaneça no interior do sistema pelo tempo necessário para que a digestão anaeróbia ocorra adequadamente e que e definida pela equação (2):

$$Vu = Vd \times TRH$$

Equação (2)

Onde:

Vu- volume útil do biodigestor (m³)

Vd- Volume diário da mistura (m³/dia)

TRH- tempo de retenção hidráulica (30 dias)

3.8.4. Volume total do biodigestor

O volume do tanque para atender o período de 30 dias de tempo de retenção e um volume adicional destinado a ser ocupado pelos gases produzidos. Segundo Pinto (2000), recomenda-se adotar $f = 0,3$ o que representa uma margem de 30% sobre o volume útil, garantindo o correto funcionamento e a segurança operacional do sistema, conforme a equação (3).

$$V_{fb} = V_u \times (1 + f)$$

Equação (3)

Onde:

V_u = Volume diário da mistura;

f = fator do volume da mistura ocupado pelos gases produzidos.

V_{fb} = Volume da fossa do biodigestor

3.9. Estimativa de produção de biofertilizante

Segundo Pinto (2000) e Barcelos (2009) para o cálculo de estimativa teórica da produção diária de biofertilizante (digestato), é adoptado o método empírico de retenção de massa, que considera que a maior parte da biomassa introduzida no biodigestor permanece no sistema após o processo de digestão anaeróbia, gerando o biofertilizante líquido e sólido. A equação (4) estima a produção diária do biofertilizante.

$$Q_{bf} = V_d \times f$$

Equação (4)

Onde:

Q_{bf} - produção diária estimada de biofertilizante (kg ou litros/dia)

f - factor de retenção da massa, adotado como 0,90 (90%)

$PTMd$: peso total da mistura diária, (kg/dia)

3.9.1. Estimativa de composição nutricional do biofertilizante

A composição nutricional do biofertilizante refere-se ao teor de macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), matéria orgânica e parâmetros como pH e relação C/N, presentes no digestato resultante da digestão anaeróbia. Esses elementos são essenciais para o desempenho agrônômico do biofertilizante e determinam sua eficiência como adubo orgânico.

Segundo Gomes et al. (2018), o digestato proveniente de resíduos vegetais apresenta valores médios de nutrientes que permitem sua aplicação direta no solo, com efeitos positivos na fertilidade e na estrutura física.

Ora, considerando que o presente estudo não realizou análises laboratoriais, adotou-se uma estimativa teórica, com base em dados da literatura científica, especialmente de pesquisas com digestatos vegetais.

Autores como Junqueira (2014) e Silva & Oliveira (2014) defendem que a utilização de valores de referência obtidos em estudos similares é uma prática válida, sobretudo em projectos de viabilidade técnica, zoneamento agrícola ou planos de aproveitamento de resíduos orgânicos.

CAPITULO IV – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O Instituto Agrário de Boane (IAB) gera, em média, 377 kg/dia de resíduos agrícolas. Para fins de estimativa de produção de biofertilizante, considerou-se a utilização de 100% desta carga, a fim de avaliar a capacidade plena do sistema em condições reais de operação.

Para a estimativa da produção de biofertilizante a partir de resíduos agrícolas no Instituto Agrário de Boane (IAB), adotou-se a metodologia empírica de retenção de massa, conforme descrita por, Barcelos (2009) e aplicada por (Gomes et al. 2018). A seguinte abordagem mostrou-se adequada ao contexto deste estudo por não exigir análises laboratoriais complexas, como a determinação de sólidos voláteis, utilizando apenas a quantidade de resíduos frescos disponíveis e a proporção de diluição.

Com base na recomendação de Gomes et al. (2018), adotou-se uma diluição de 1:1 com água, resultando em um total de 754 kg/dia de mistura. De acordo com Barcelos (2009), cerca de 90% dessa massa permanece no sistema como digestato, sendo convertida em biofertilizante.

O dimensionamento do sistema considerou a carga diária de 0,754 m³/dia e adotou-se um tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias, apropriado para resíduos com alta carga lignocelulósica, como palha, folhas e capim, os quais exigem maior tempo de digestão para assegurar a decomposição eficiente da matéria orgânica (Barcelos, 2009). Aplicando a equação foi obtido um volume útil estimado de 22,6 m³ para o biodigestor, valor consistente com os parâmetros sugeridos por Pinto (2000) e Barcelos (2009) para sistemas de pequeno porte com substrato vegetal. É necessário considerar não apenas o volume útil, isto é, volume ocupado pelo substrato em digestão, mas também o espaço destinado ao armazenamento de biogás, geralmente localizado na parte superior da câmara de digestão. O volume total do biodigestor projetado foi estimado em 29,38 m³, incluindo uma margem adicional de 30% para o acúmulo de gases.

Do ponto de vista técnico, os resultados indicam que o IAB possui volume suficiente de resíduos agrícolas para operar um biodigestor de produção contínua de biofertilizante. Isso permitiria a substituição parcial de insumos químicos e o aumento da sustentabilidade das práticas agrícolas adotadas na instituição.

Quanto à viabilidade operacional, destaca-se que o Instituto já possui experiência com biodigestores voltados à produção de biogás a partir de lamas fecais. Segundo a WaterAid Moçambique (2016), o biodigestor existente tem capacidade de 80 m³ e serve a 660 pessoas, o que demonstra que há infraestrutura e conhecimento técnico que podem ser aproveitados na implantação de um sistema de digestão com foco em biofertilizantes.

4.1. Estimativa de produção do biofertilizante e composição nutricional

➤ Biofertilizante:

A produção de biofertilizante é estimada com base no princípio da conservação de massa, considerando que cerca de 90% da massa introduzida no biodigestor permanece no sistema como digestato tendo em conta a fração líquida e sólida, (Barcelos, 2009). Com isso, adoptando um factor de retenção de 0,90 e o PTMd de 754 kg/dia, estimou-se uma produção teórica de aproximadamente 678,6 litros por dia de biofertilizante. Projectando esse volume para um período de operação anual, tem-se um total de 247,7 toneladas de digestato.

O digestato é composto por duas frações: líquida e sólida. Com base em estudos com resíduos vegetais, assume-se que cerca de 90% do digestato é composto pela fração líquida, e 10% pela fração sólida (Gomes et al., 2018; Junqueira, 2014).

- Fração líquida estimada: 222,9 toneladas/ano;
- Fração sólida estimada: 24,8 toneladas/ano;

Com base na dose média de 25.000 L/ha/ano, recomendada para culturas de ciclo curto e média exigência nutricional, como milho, feijão e hortícolas, estima-se que o biofertilizante produzido anualmente pelo Instituto Agrário de Boane poderia ser aplicado em uma área de aproximadamente 9,9 hectares por ano, considerando uso integral e contínuo do digestato gerado (Gomes et al., 2018).

➤ **Estimativa nutricional:**

Considerando que o presente trabalho não incluiu análises laboratoriais químicas do biofertilizante, foi adotada uma estimativa teórica baseada em faixas médias já observadas por estudos acadêmicos com digestatos vegetais similares.

Segundo Gomes et al. (2018), resíduos agrícolas tendem a gerar biofertilizantes com maior conteúdo de matéria orgânica e potássio, mas concentrações relativamente menores de nitrogênio e fósforo em comparação com digestatos derivados de resíduos animais.

Tabela 10: Resumo dos resultados obtidos

Parâmetro	Faixa estimada (% m/v)	Fonte
Nitrogênio (N)	0,2 – 0,4	Gomes et al., 2018
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,05 – 0,2	Silva & Oliveira, 2014
Potássio (K ₂ O)	0,3 – 0,5	Junqueira, 2014
Matéria Orgânica (MO)	10 – 15	FAO, 2017
pH	7,5 – 8,5	FAO, 2017
Relação C/N	30 – 50	FAO, 2017

Fonte: Adaptado pela autora de Barcelos (2009)

Os valores apresentados são estimativos teóricos baseados na literatura, considerando a composição média de resíduos vegetais. Análises laboratoriais do digestato produzido no IAB são recomendadas para validação e ajuste das recomendações agronômicas. Ainda assim, os dados sugerem que o biofertilizante gerado tem potencial para contribuir de forma expressiva para a fertilidade do solo e sustentabilidade do sistema agrícola do Instituto Agrário de Boane.

Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos

Cálculo	Fórmula Utilizada	Resultado
Volume diário da mistura	$Vd = PTMd / \rho a$	0,754 m ³ /dia
Volume útil do biodigestor	$Vu = Vd \times TRH$	22,6 m ³
Volume total do biodigestor	$Vt = Vu \times (1 + f) \rightarrow f = 30\%$	29,38 m ³
Produção diária de biofertilizante	$Qbf = PTMd \times f \rightarrow f = 0,90 (90\%)$	678,6 litros/dia
Produção anual de biofertilizante	$Qbf \times 365 \text{ dias}$	247,7 toneladas/ano
Fração líquida do biofertilizante	90% de 247,7 t/ano	222,9 toneladas/ano
Fração sólida do biofertilizante	10% de 247,7 t/ano	24,8 toneladas/ano
Área agrícola atendida (dose de 25.000 L/ha)	$247.700 \text{ L} \div 25.000 \text{ L/ha}$	9,9 hectares/ano

Fonte: Autora

CAPITULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Com o desenvolvimento deste trabalho, conclui-se, em primeira instância, que, de acordo com informações fornecidas pela Direção de Produção, o Instituto Agrário de Boane (IAB) já realiza algum aproveitamento dos resíduos agrícolas, principalmente na forma de compostagem para adubação e produção de ração para alguns animais. No entanto, uma grande quantidade desses resíduos ainda não é, devidamente, reaproveitada o que acaba resultando em desperdício de matéria orgânica com alto potencial agronômico.

Ressalta-se ainda que, o IAB conta com um projecto coordenado pela WaterAid Moçambique voltado para o aproveitamento de resíduos fecais na produção de biogás. Nesse contexto, a experiência técnica adquirida com o uso de biodigestores pode ser expandida para o tratamento de resíduos agrícolas, com foco não apenas na geração de energia, mas também e principalmente na produção de biofertilizante, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e ambientalmente correctas.

Com base nas estimativas realizadas quanto à geração diária de resíduos, na análise do tempo de retenção hidráulica e no dimensionamento do biodigestor, conclui-se que há viabilidade técnica e estrutural para a produção de biofertilizante no Instituto Agrário de Boane. Os cálculos indicam que o volume de resíduos agrícolas disponíveis é suficiente para abastecer um sistema de biodigestão, capaz de gerar, anualmente, cerca de 247 toneladas de biofertilizante, com propriedades nutricionais relevantes para uso agrícola.

A transformação dos resíduos agrícolas em biofertilizante no IAB permitiria a substituição parcial dos adubos químicos convencionais, reduzindo custos de produção, promovendo a conservação do solo e eliminando práticas prejudiciais como a queima de resíduos orgânicos, direccionando todos os resíduos para a sua transformação em biofertilizante nos biodigestores. Desta forma, a adoção do biodigestor voltado à produção de biofertilizante representa uma solução viável, eficaz e alinhada às estratégias de sustentabilidade e segurança alimentar.

5.2. Recomendações

No âmbito do incentivo ao uso de energias menos degradáveis ao meio ambiente e reforço da mobilização da prática da reciclagem e reutilização dos resíduos, recomenda-se ao Instituto Agrário de Boane as seguintes acções:

- **Investimento em pesquisas energéticas** – O principal objectivo desta acção é munir os estudantes de capacidade de desenvolver projectos de produção de energia com a matéria-prima disponível, o que culminará com a redução significativa do valor gasto com a compra de energia;
- **Produção de adubos com base nos resíduos orgânicos** – Os resíduos orgânicos, através do processo de compostagem, produzem adubos com forte capacidade nutritiva (minerais no solo) e que são, ambientalmente, benéficos já que na sua composição não existe nenhum agrotóxico;
- **Educação Ambiental** – Os processos de gestão utilizados na eliminação dos resíduos no Instituto Agrário de Boane, mostra a fraca consciência ambiental dos técnicos e estudantes da instituição. Desta forma, recomendamos aos técnicos e responsáveis do centro a incentivar a realização de palestras e actividades que visem melhorar a relação do Instituto Agrário de Boane com o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bachmann, P., Mayerová, M., & Ragályi, P. (2023). Long-term application of biogas digestate improves soil physical, chemical and mineralogical properties

Balmant, W. (2010). Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica [Master's thesis, Universidade Federal do Paraná].

Barcelos, A. S. (2009). Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: Experimentos com digestores anaeróbios [Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia].

Barreira, P. (2003). Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural (2ª ed.). São Paulo.

Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdi, M. (2004). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste. *Bioresource Technology*, 86(1), 85–89.

Cassini, S. T., Christ, D., & Boaro, C. S. F. (2014). Biogás: Geração, purificação e usos. Interciência.

Chernicharo, C. A. L. (2007). Reatores biológicos: Fundamentos e aplicações à engenharia sanitária. UFMG.

Cortez, L. A. B., et al. (2008). Biomassa para energia. Editora da UNICAMP.

Bona, D., Papurello, D., Flaim, G., et al. (2020). Gestão do digestato e dos gases residuais de células a combustível de óxido sólido produzidos em uma planta-piloto de digestão anaeróbia seca: abordagem com cultivo de microalgas.

FAO (2017). Gestão sustentável de resíduos agrícolas. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura.

FNR. (2010). Guia prático de biogás: Geração e utilização (5ª ed.). Gulzow.

- Gideão, E. E. (2012). Formas de energia renovável em Moçambique e suas potencialidades. Maputo.
- Gil, A. C. (1994). Como elaborar projetos de pesquisa (3ª ed.). Atlas.
- Gil, A. C. (2010). Como elaborar projetos de pesquisa (5ª ed.). Atlas.
- Grychek, J. M., & Belo, F. R. (1983). Produção e uso do gás metano na agricultura agroindustrial.
- Goldemberg, J., & Teixeira Coelho, S. (2004). Energia renovável – biomassa tradicional versus biomassa moderna. *Política Energética*, 32(6), 711–714
- Gomes, L. P., Velho, D., Pieri, R., Caetano, M. O., & Miranda, L. A. S. (2018). Potencialidade energética e qualidade do biofertilizante produzido em biodigestão de resíduos sólidos putrescíveis de restaurante universitário.
- Gonçalves, H. F. E., Rodrigues, L. C., & Silva, E. L. (2009). O biodigestor como princípio de sustentabilidade de uma propriedade rural. *In Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais*.
- Horst, W. J. (2013). Nutrient use efficiency in plants: *Concepts and approaches*. Springer.
- IPEA. (2012). Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas: Relatório de pesquisa.
- Junqueira, S. L. (2014). Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: Estudo de caso na Fazenda Aterrado [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica]. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Karekezi, S., Lata, K., & Coelho, S. T. (2004). Traditional biomass energy. In *International Conference for Renewable Energies*, Bonn.
- Karlsson, L., et al. (2014). Manual básico de biofertilizante (1ª ed.). UNIVATES.

- Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O'Dwyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology – A review. *Bioresource Technology*.
- Konrad, O. (2014). Manual básico de biogás (1ª ed.). Univates
- Junior, A. (2000). Parâmetros da digestão anaeróbia relacionados à geração de biogás. In P. Prati (Org.), *Estudos sobre digestão anaeróbia* (pp. 45–60). Editora Acadêmica.
- Labegalini, A. (2013). Obtenção de biochar a partir da pirólise rápida da torta de pinhão-mansão [Master's thesis, Universidade Federal de Lavras].
- Lambo, J. P. (2024). Potencial agrônomico de biofertilizantes em áreas de pequeno porte. Universidade Eduardo Mondlane.
- Lundin, M. (2016). Life cycle assessment of energy from biogas produced from manure, maize and municipal organic waste. *Environmental Science & Technology*, 50(16), 8895–8903.
- Magalhães, A. P. T. (1986). Biogás: Um projeto de saneamento urbano.
- Marconi, M. D., & Lakatos, E. M. (2003). Fundamentos da metodologia científica. Atlas.
- Marrocos, R. F., Sodr e, G. A., & Baon, J. (2012). Concentração de nutrientes (NPK) e pH em biofertilizantes líquidos derivados de esterco animal. *Estudos de Ciência do Solo*, 7(2), 123–130.
- Mazzucchi, C. (1980). Digestores anaeróbicos rurais: Dimensionamento e desempenho. Universidade Estadual de Campinas.
- Micoa. (2009). Meio Ambiente em Moçambique. Moçambique.
- Mortoza, G. L. (2010). Geração de energia elétrica utilizando a biomassa [Master's thesis, Universidade de Brasília].
- Oliveira, L. R. P. (2005). Biodigestor. In IIV simpósio goiano de avicultura e II simpósio goiano de suinocultura (pp. 13–15). Goiânia.

Oliveira, P. A. V., & Higarashi, M. M. (2006). Geração e produção de biogás em unidades de produção de suínos. Embrapa Suínos e Aves.

Oliveira, R. D. (2009). Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades em mercado de carbono.

Oliveira, S. G. L. (2011). Aproveitamento energético de resíduos agrícolas: Caso da agroelectricidade distribuída.

Oliveira, D. S. (2012). Digestato como fertilizante orgânico no processo de produção de biogás.

Pecora, V. (2006). Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso.

Pinto, R. (2000). Estudo experimental de digestores rurais [Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas].

Prati, L. (2010). Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores [Master's thesis, Universidade Federal do Paraná].

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). (2010). *Biofertilizer Production, Private Finance for the SDGs*. United Nations Development Programme.

Quissico, D. Z. (2005). Estudo de comportamento de energia solar em Moçambique. Maputo.

Saravanan, V., & Sreekrishnan, T. R. (2005). Modelling anaerobic biofilm reactors – A review. *Journal of Environmental Management*, 81(1), 1–18.

Santos, M. A. P. (2014). Subprodutos do milho: *Caracterização e uso agrícola*. Universidade Federal de Santa Maria.

Silva, E. S., & Oliveira, G. S. (2014). Biodigestor: Uma proposta de aproveitamento do lixo orgânico no município de Santarém. Santarém – Pará – Brasil.

Silva, J. M. (2013). Produção de biogás com dejetos de vacas [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual do Paraná]. Paraná

Simon, F. W. (2020). *Valorização do digestato proveniente da digestão anaeróbia de resíduos alimentares* (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

Sordi, A. (2016). Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná.

Souto, A. M. (2005). Efeito do biofertilizante na produtividade de culturas hortícolas. Universidade Eduardo Mondlane.

TECPAR. (2002). Potencial de aproveitamento de resíduos para biogás no Brasil. Instituto de Tecnologia do Paraná.

Unal, H., & Alibas, I. (2007). Determination of thermal utilization efficiency of biomass. *Journal of Energy in Southern Agriculture*

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933.

Viera, A. C. (2012). Caracterização dos resíduos provenientes dos resíduos agrícolas. Cascavel–Paraná, Brasil.

WaterAid Moçambique. (2016). Garantir água potável, saneamento adequado e higiene para todos até 2030. (Edição especial)

Wellinger, A. (1984). Digestão anaeróbia: uma revisão comparativa com dois tipos de sistemas de aeração para o tratamento de esterco e produção de energia em pequenas propriedades rurais.