

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**UMA REVISÃO DOS DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA
APLICAÇÃO DE PÓS-TRATAMENTOS AO DIGESTATO DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Mariana de Mattos Pizarro

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa

São Carlos – SP
2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 12 de setembro de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa, DEQ/UFSCar

Convidado: Prof. Me. Túlio Queijo de Lima, EESC/USP

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ruy de Sousa Junior, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Gostaria, inicialmente, de agradecer à minha família por todo apoio e amor que me deram não só para elaboração deste trabalho, mas em toda minha trajetória até aqui. Em especial minhas irmãs Isadora e Laura, por estarem presentes em todos os meus momentos e nunca me deixarem cair.

Agradeço ao meu companheiro Felipe, por todo amor, compreensão e por ter acreditado em mim quando eu mesma não acreditei, sem você eu não teria conseguido.

A minha madrinha Maria Angélica, que tornou tudo isso possível, por toda paciência e apoio em todos esses anos.

Às Repúblicas Frenéticas e Sete Eh Poko, por terem sido minha casa e tornarem essa trajetória mais incrível ainda. A gente era feliz e sabia.

Com toda a minha admiração que expresso meu agradecimento a minha orientadora Professora Paula Rúbia Ferreira Rosa por todo aprendizado e atenção, a senhora é um exemplo e inspiração.

RESUMO

A digestão anaeróbia é uma tecnologia de processo consolidado para o gerenciamento de resíduos, com um grande número de publicações neste tópico, devido à sua capacidade de degradar resíduos sólidos orgânicos e gerar biogás como energia renovável. Associado ao problema de geração de resíduos temos também a emissão de gases do efeito estufa, na qual o gás metano é o segundo gás de efeito estufa mais abundante gerado pelo homem, e hoje a terceira maior fonte de emissão desse gás são os lixões, principalmente de resíduos sólidos urbanos. Com a evolução crescente da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos, o descarte e a utilização de resíduos de biogás (ou seja, digestato) tornam-se um problema proeminente. Para elucidar as pesquisas, e evolução relacionadas ao tratamento do digestato, este trabalho tem como objetivo apresentar o cenário de pesquisas atual no mundo frente aos pós-tratamentos do digestato proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e suas possíveis aplicações como produto de valor. Além disso, entender os principais aspectos e etapas envolvidas nos processos e possibilidade de utilização no Brasil. A plataforma do Web of Science foi usada para selecionar os artigos. Foram encontradas 1632 publicações no período de 2002 até 2022. Os resultados indicaram que o ano de 2021 teve maior número de publicações, com 313 artigos e Itália e China foram os países que mais publicaram, com 268 e 262 publicações respectivamente. Entre os artigos selecionados como mais relevantes, o objetivo mais observado foi a avaliação de pós-tratamentos do digestato para uso como fertilizante e outros produtos de valor, e entre eles os tratamentos mais aplicados ao digestato foram a filtração e centrifugação para o digestato cru, a compostagem para a fração sólida do digestato, com 38% dos trabalhos selecionados como relevantes, e os tratamentos de filtração por membrana e stripping de amônia para fração líquida do digestato com 12 e 11 publicações respectivamente. Foi possível concluir que uma abordagem integrada de produção de energia e aproveitamento de resíduos pode ser utilizada, na qual vários compostos de valor agregado podem ser extraídos ao longo do processo de digestão anaeróbica e depois da mesma, chegando no conceito de produção circular.

Palavras chaves: FORSU, Fração sólida do digestato, Fração líquida do digestato, Tratamento do digestato, Produtos da Digestão Anaeróbia, Biodigestão anaeróbia, Biometanização.

ABSTRACT

Anaerobic digestion is a consolidated process technology for waste management, with a large number of publications on this topic, due to its ability to degrade organic solid waste and generate biogas as a renewable energy. Associated with the problem of waste generation, we also have the emission of greenhouse gases, in which methane gas is the second most abundant greenhouse gas generated by man, and today the third largest source of emission of this gas are dumps, mainly of urban solid waste. With the increasing evolution of anaerobic digestion in waste treatment, disposal and utilization of biogas waste (ie digestate) becomes a prominent problem. To elucidate the research and evolution related to the treatment of digestate, this work aims to present the current research scenario in the world regarding post-treatments of digestate from the anaerobic digestion of municipal solid waste and its possible applications as a valuable product. In addition, understand the main aspects and steps involved in the processes and possibility of use in Brazil. The Web of Science platform was used to select the articles. 1632 publications were found in the period from 2002 to 2022. The results indicated that the year 2021 had the highest number of publications, with 313 articles and Italy and China were the countries that published the most, with 268 and 262 publications respectively. Among the articles selected as most relevant, the most observed objective was the evaluation of post-treatments of digestate for use as fertilizer and other valuable products, and among them the most applied treatments to digestate were filtration and centrifugation for raw digestate, composting for the solid fraction of the digestate, with 38% of the works selected as relevant, and the membrane filtration and ammonia stripping treatments for the liquid fraction of the digestate, with 12 and 11 publications respectively. It was possible to conclude that an integrated approach to energy production and waste utilization can be used, in which several value-added compounds can be extracted throughout the anaerobic digestion process and after it, arriving at the concept of circular production.

Keywords: FORSU, Digestate solid fraction, Digestate liquid fraction, Digestate treatment, Anaerobic Digestion Products, Anaerobic Biodigestion, Biomethanization.

SUMÁRIO

Banca Examinadora.....	I
Agradecimentos.....	II
Resumo.....	III
Abstract.....	IV
Lista de Figuras.....	V
Lista de Tabelas.....	VI
Nomenclatura.....	VII
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. QUESTÕES CLIMÁTICAS.....	4
2.1.1. EFEITO ESTUFA.....	4
2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	6
2.2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO MUNDO E NO BRASIL.....	9
2.2.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	10
2.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	11
2.3.1. ETAPAS DA DIGESTÃO.....	13
2.3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COMO SUBSTRATOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	14
2.3.3. ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE FORSU.....	15
2.3.4. PRÉ-TRATAMENTOS DE FORSU NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	16
2.3.5. PRODUTOS DA DIGESTÃO A PARTIR DE FORSU.....	18
2.4. CARACTERIZAÇÃO DO DIGESTATO.....	19
2.5. MANEJO E APROVEITAMENTO DO DIGESTATO.....	20

2.6. PÓS-TRATAMENTOS DO DIGESTATO.....	21
2.6.1. SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	26
2.6.1.1. FILTRAÇÃO.....	26
2.6.1.2. CENTRIFUGAÇÃO.....	27
2.6.2. FRAÇÃO LÍQUIDA DO DIGESTATO.....	28
2.6.3. TRATAMENTO DA FRAÇÃO LÍQUIDA.....	30
2.6.3.1. SEPARAÇÃO POR MEMBRANA.....	30
2.6.3.2. CULTIVO DE MICROALGAS.....	31
2.6.3.3. STRIPPING DE AMÔNIA.....	32
2.6.4. FRAÇÃO SÓLIDA DO DIGESTATO.....	33
2.6.5. TRATAMENTO DA FRAÇÃO SÓLIDA.....	34
2.6.5.1. COMPOSTAGEM.....	34
2.7. BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE RSU.....	40
2.8. DESAFIOS E PERSPECTIVAS.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1. LEVANTAMENTO DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS.....	44
3.2. ANÁLISE DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS MAIS RELEVANTES.....	45
3.3. PÓS-TRATAMENTOS COM MAIOR POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO DIGESTATO PARA PRODUÇÃO COMO PRODUTO DE VALOR.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1. PESQUISA DE PUBLICAÇÕES.....	46
4.1.1. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS ESTUDOS AO LONGO DOS ANOS ...	46
4.1.5. ÁREAS DE PESQUISA.....	48
4.1.2. PAÍSES QUE MAIS PUBLICAM.....	49
4.1.3. AUTORES QUE MAIS PUBLICAM.....	50
4.1.4. TIPOS DE PUBLICAÇÃO.....	51
4.2. PUBLICAÇÕES RELEVANTES.....	52
4.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS TRABALHOS SELECIONADOS.....	52
4.2.2. OBJETIVO DOS TRABALHOS RELEVANTES.....	61

4.2.3. DISTRIBUIÇÃO ANUAL DOS TRABALHOS RELEVANTES SELECIONADOS.....	63
4.2.4. PROCESSOS DE TRATAMENTO DO DIGESTATO CONSOLIDADOS.....	64
4.2.4.1. TRATAMENTOS PARA O DIGESTATO CRU	64
4.2.4.2. TRATAMENTOS PARA FRAÇÃO SÓLIDA.....	65
4.2.4.3. TRATAMENTOS PARA FRAÇÃO LÍQUIDA.....	66
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	68
5.1. CONCLUSÕES.....	68
5.2. CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Emissão de gases do efeito estufa por setor no Brasil	6
Figura 2.2.	Composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos no Brasil	7
Figura 2.3.	Caracterização geral de resíduos sólidos urbanos	8
Figura 2.4.	Fluxograma simplificado do processo de digestão anaeróbia e produtos	12
Figura 2.6.	Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos nas etapas da digestão anaeróbia	14
Figura 2.6.	Técnicas de pré-tratamento dos FORSU da digestão anaeróbia	17
Figura 2.7.	Processos de tratamento do digestato	23
Figura 2.8.	Fluxograma simplificado do processo de compostagem	35
Figura 2.9.	Fases da compostagem	36
Figura 3.1.	Fluxograma das etapas que compõem a análise bibliométrica realizada	46
Figura 4.1.	Publicações sobre tratamento do digestato da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos desde 2002 na base de dados Web of Science	47
Figura 4.2.	Quantidade de publicações por área de pesquisa na base de dados Web of Science	49
Figura 4.3.	Trinta países com estudos mais publicados sobre tratamento do digestato na base de dados Web of Science	50
Figura 4.4.	Vinte autores com estudos mais publicados sobre tratamento do digestato na base de dados Web of Science	51
Figura 4.5.	Tipos de publicações sobre tratamento do digestato na base de dados Web of Science	52
Figura 4.6.	Volume de publicações por objetivo dos trabalhos selecionados	62
Figura 4.7.	Tratamentos aplicados ao digestato cru identificados nos artigos selecionados	65
Figura 4.8.	Tratamentos aplicados a fração sólida do digestato nos artigos relevantes	66
Figura 4.9.	Tratamentos aplicados a fração líquida do digestato nos artigos selecionados	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Processos de pós-tratamentos do digestato	24
Tabela 2.2.	Níveis de temperaturas dos organismos presentes na composteira para as bactérias mesófilas e termófilas	39
Tabela 2.3.	Critérios de caracterização do digestato para uso como fertilizante	42
Tabela 4.1.	Processos descritos nos trabalhos selecionados para tratamento do digestato	53
Tabela 4.2.	Generalização de objetivos específicos dos trabalhos selecionados	60

NOMENCLATURA

- C/N - Carbono/Nitrogênio
- COV - Compostos orgânicos voláteis
- CT - Carbono total
- DA - Digestão anaeróbia
- DBO - Demanda bioquímica de oxigênio
- DQO - Demanda química de oxigênio
- FORSU - Fração orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos
- GEE - Gases do efeito estufa
- LHV - Baixo poder calorífico
- MO - Matéria orgânica
- MS - Matéria seca
- NAT - Nitrogênio amoniacal total
- NKT - Nitrogênio de Kjeldahl total
- NT - Nitrogênio total
- PNRS - Política Nacional de Saneamento Básico
- RSU - Resíduos sólidos urbanos
- ST - Sólidos totais
- SV - Sólidos voláteis
- SVT - Sólidos voláteis totais
- TK - Potássio total
- TP - Fósforo total
- WtE - *Waste to energy*

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da economia e da população global, crescem as preocupações com o impacto que causamos ao meio ambiente e a consequente manutenção da vida no planeta. O crescente aumento da geração de resíduos é um dos temas mais discutidos nos últimos anos. Associado a este fato a emissão de gases do efeito estufa (GEE) contribui para o aquecimento global, sendo que o gás metano é o segundo gás de efeito estufa mais abundante gerado pelo homem, e hoje, a terceira maior fonte de emissão desse gás são os lixões, principalmente de resíduos sólidos urbanos (RSU) (Our World in Data, 2022). Desta forma, surge a necessidade da utilização de novas fontes renováveis de energia, e estratégias de aproveitamento de resíduos gerados pela população.

As duas pautas se encontram quando tratamos da produção de energia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), de forma que tornamos estes resíduos substratos de valor para geração de energia renovável.

Entre as formas alternativas de obtenção de biocombustíveis destaca-se o processo de digestão anaeróbia (DA), onde a partir da FORSU são gerados gases, como o metano (biogás) e hidrogênio, e produtos químicos, como ácidos orgânicos voláteis. Estes produtos são capazes de fornecer energia a partir de sua queima, como também serem utilizados em outros processos industriais, abrindo a possibilidade de sua produção de forma a se estabelecer uma economia mais sustentável.

O biogás como forma de energia renovável, e sua produção a partir de FORSU são elementos na luta contra o aquecimento global (Herbes et al., 2020). A DA tem sido amplamente aplicada no tratamento de FORSU no mundo devido à sua capacidade de degradar resíduos sólidos orgânicos e gerar energia renovável (Dantas et al., 2016).

Além de biogás, a DA gera um outro subproduto, o digestato ou digerido. O digestato trata-se da biomassa fermentada que permanece após a digestão do substrato, e chega a representar cerca de 90 a 95% do total alimentado na DA (Lamolinara et al., 2022). Atualmente essa biomassa é considerada um resíduo da DA, e muitas vezes é descartada em aterros ou incinerada, porém, o digestato é um produto rico em nutrientes com grande

potencial de utilização, e seu uso como fertilizante, melhorador do solo e outros produtos de valor tem sido amplamente estudado (Shanta et al., 2021).

Atualmente o digestato tem sido pouco explorado como produto de valor, principalmente no Brasil onde a produção de energia pela DA ainda é uma prática emergente (Kunz et. al., 2009). O digestato quando não é descartado, é utilizado principalmente em sua forma pura, sem tratamento, direto em pequenas lavouras próximas do local em que ocorreu o processo da DA. Apesar da possibilidade do digestato ser usado na sua forma pura após a digestão anaeróbia, para melhor aproveitamento de seus nutrientes e menor impacto ambiental, se faz necessário o uso de pré-tratamentos antes da sua aplicação como biofertilizante, entre eles o controle de amônia, sanitização e separação sólido-líquido.

Apesar de seu grande potencial de utilização, o gerenciamento do digestato de FORSU ainda gera muitos desafios, por seu alto teor de umidade seu transporte para regiões fora do local de produção pode ser um processo caro, e sua aplicação como fertilizante em estado cru pode gerar impactos negativos ao meio ambiente. Desta forma, surge a necessidade de tratamentos viáveis economicamente que possibilitem sua utilização.

A separação das frações do digestato é um processo econômico e deve ser o primeiro tratamento aplicado ao digestato cru. O processamento de separação adequado do digestato depende das características físico-químicas do mesmo, e seu uso final. Podemos classificar os diferentes processos em: biológicos, físicos, e químicos.

Alguns desses processos são caros devido aos seus altos requisitos de energia, baixa eficiência, ou por ainda estarem em fases iniciais de desenvolvimento (Lamolinara et al., 2022), principalmente os processos químicos e biológicos. Sendo assim, os processos físicos são considerados os mais promissores para separação sólido-líquido do digestato, permitindo que as frações sólida e líquida sejam utilizadas separadamente de forma a otimizar e direcionar de forma mais adequada sua aplicação.

Dentro deste contexto, o objetivo desse trabalho é realizar uma análise bibliográfica avaliando as tecnologias existentes ao redor do mundo para tratamento do digestato gerado na produção de biogás a partir de FORSU, a fim de entender quais os principais processos em larga escala e suas possibilidades de aplicação no Brasil. Essa avaliação também permitirá entender quais países mais avançaram em relação a estudos sobre o tema e aplicações desses processos, e como esses estudos evoluíram ao longo dos anos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é apresentar o cenário de pesquisas atual no mundo frente aos pós-tratamentos do digestato proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e suas possíveis aplicações como produto de valor, de forma a favorecer um modelo de economia circular de gestão de resíduos, com aproveitamento de toda a matéria orgânica e nutrientes presentes no mesmo seguindo um conceito de “zero-resíduo”, que seria a máxima redução de rejeitos no final do processo. Além disso, entender os principais aspectos e etapas envolvidas nos processos e possibilidade de utilização no Brasil.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar uma análise bibliométrica como uma ferramenta de pesquisa comum usando análise e estatísticas para descrever a tendência de tecnologias inovadoras e processos consolidados para tratamento do digestato proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos.
2. Realizar análise quantitativa das publicações levantadas pelos critérios de “autor”, “país”, “tipo de documento”, “ano de publicação”, “área de pesquisa”
3. Avaliar as alternativas de pós-tratamentos do digestato proveniente da DA de FORSU utilizados atualmente no mundo e viabilidade de aplicação no Brasil.
4. Fazer análise quantitativa das publicações mais relevantes pelos critérios de evolução cronológica e objetivos da publicação.
5. Identificar e fazer análise quantitativa dos métodos de pós-tratamentos utilizados nas publicações mais relevantes
6. Demonstrar a importância do uso de tecnologias para estabilização do digestato que possibilitem sua utilização como produto de valor e sinalizar pontos importantes que necessitem de mais pesquisas

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. QUESTÕES CLIMÁTICAS

De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU) a população mundial chegou aos 7.7 bilhões de pessoas no ano de 2020, e a projeção é de que o mundo atinja o valor de 8,5 bilhões de habitantes em 2030 e 9,7 bilhões em 2050. O crescimento acelerado da população mundial tem consequências, dentre eles temos o aumento da demanda energética, intensificação das atividades industriais e maior geração de resíduos, todos fatores que contribuem para o agravamento do efeito estufa (Ram et al., 2021).

Segundo os acordos firmados para conter o efeito estufa, toda geração de energia mundial deve ser de baixo carbono até 2050, e a geração total deve ser aumentada para permitir a eletrificação de sistemas que hoje vem da queima de combustíveis. Para o cumprimento desta meta a matriz energética mundial deve ser alimentada principalmente por fontes renováveis de energia, complementadas por uma combinação de energia nuclear e uma pequena parcela de queima de combustíveis fósseis (Sousa, R., 2022).

Segundo o último relatório do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) as emissões de gases causadores do efeito estufa continuam aumentando, e os planos atuais para combater essas emissões não são suficientes para atingir o objetivo de limitar o aumento da temperatura em 1,5°C em comparação com o período pré-industrial. Esse objetivo foi definido no Acordo de Paris como valor máximo que os cientistas acreditam que conseguimos atingir sem causar danos irreversíveis ao planeta (TNC, 2022).

A nível global, as emissões de gases do efeito estufa (GEE) aumentaram na última década, atingindo 59 gigatoneladas de CO₂ equivalente (Gt CO₂e) em 2019, 12% a mais do que em 2010 e 54% a mais que em 1990 (Schumer et al, 2022).

2.1.1. EFEITO ESTUFA

O efeito estufa é um fenômeno atmosférico natural responsável pela manutenção da temperatura média da Terra, onde os gases presentes na atmosfera absorvem o calor do sol de forma que este não seja totalmente irradiado de volta para o espaço. Porém com a emissões excessivas de gases à atmosfera esse efeito tem se intensificado.

Existem quatro principais gases responsáveis pelo efeito estufa, são eles: dióxido de carbono, sendo esse o mais abundante e principal produto da atividade humana como a queima de combustíveis fósseis; gás metano, segundo maior contribuinte para aumento da temperatura no planeta este gás é emitido principalmente de aterros sanitários e pecuária extensiva, ele é mais eficiente na captura de radiação do que o CO₂ sendo, 80 vezes mais potente no aquecimento global que o CO₂ em um período de 20 anos. E também é o principal contribuinte para a formação do ozônio ao nível do solo, este sendo um poluente perigoso do ar e também gás de efeito estufa (UNEP, 2021); óxido nitroso, pode ser emitido por bactérias no solo ou oceano, e a agricultura é sua principal fonte de emissão advinda da atividade humana; e por fim gases fluoretados principais agentes de destruição da camada de ozônio, produzidos pelo homem para atividades industriais (Sousa, R., 2022).

As emissões de gases do efeito estufa têm sido alvo de discussão em âmbito internacional, sendo tema de debates em conferências internacionais, como a COP 26 (Conferência do Clima das Nações Unidas em Glasgow). Realizada em 2021 a conferência foi vista como oportunidade para definições de ações que levariam o mundo a chegar mais perto do estabelecido no Acordo de Paris para conter as emissões de GEE e o impacto das mudanças climáticas no planeta. A conferência foi encerrada com o sentimento de ter deixado a desejar em termos de ações propostas, porém cumpriu o papel de manter a meta de variação da temperatura global em 1,5°C (Genin et al., 2021).

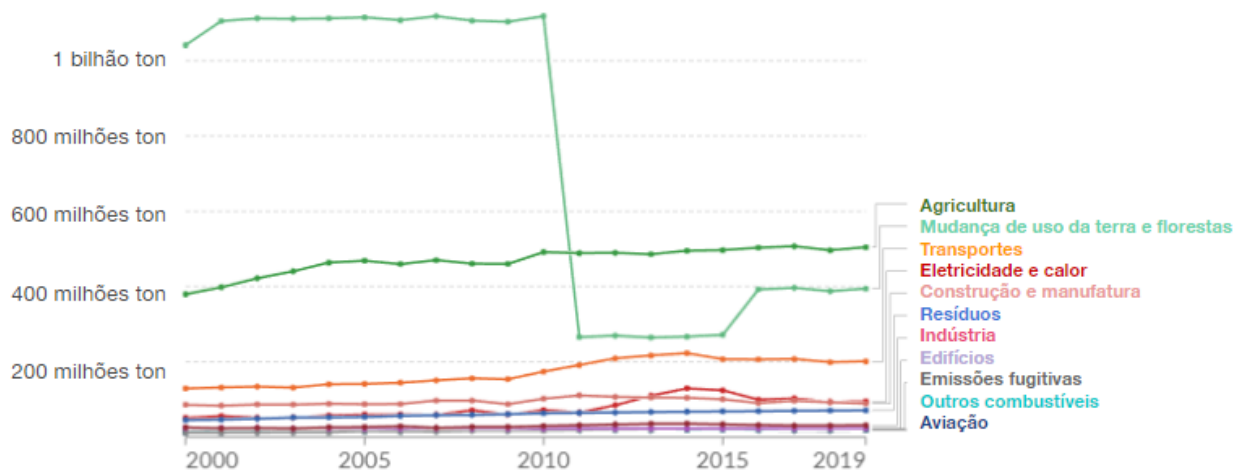
Segundo o IPCC, para o cumprimento desta meta, apenas 510 Gt de CO₂ ainda poderiam ser emitidos antes de chegarmos ao zero líquido em 2050. Porém as projeções das emissões futuras de CO₂ considerando a configuração energética atual baseada em combustíveis fósseis indicam que as emissões chegarão a 850 Gt - 340 Gt acima do limite (Genin et al., 2021).

Liderado pelos Estados Unidos e União Européia, o Compromisso Global de Metano, tem como objetivo a meta de reduzir as emissões de gás metano em 30% até 2030. O Brasil está entre os países signatários do compromisso, sendo um dos maiores produtores de gás metano advindos da atividade agropecuária (Genin et al., 2021).

Dentre os principais setores responsáveis pela emissão de GEEs no Brasil, encontra-se o setor energético, que, em 2019, foi responsável por 19% das emissões (Our World in Data, 2022) como mostra a Figura 2.1. O setor de energia é amplo, incluindo o setor de transporte,

eletricidade e geração de calor, edifícios, fabricação e construção, emissões fugitivas e outras queimas de combustível.

Figura 2.1. Emissão de gases do efeito estufa por setor no Brasil



Fonte: Adaptado de Our World in Data, 2022

À medida que se dá o aumento do efeito estufa por queima de combustíveis fósseis e, excesso de resíduos orgânicos, também emissores de GEE, se faz necessária a produção de energias alternativas e soluções mais limpas e eficientes para o descarte e de resíduos (Cheong et al., 2020). Como solução para ambos os problemas uma alternativa são os processos que visam utilizar esses resíduos como substrato para produção de bioenergia.

2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As pesquisas para desenvolvimento de fontes alternativas de energia têm aumentado nos últimos anos devido aos desafios ambientais recentes (Owamah et al., 2014). Como mencionado anteriormente, a queima de combustíveis fósseis não é o único fator responsável pelo aumento da emissão de GEE, os resíduos orgânicos acumulados em aterros sanitários e lixões são grande parte do problema, e estes vem aumentando com o crescimento populacional.

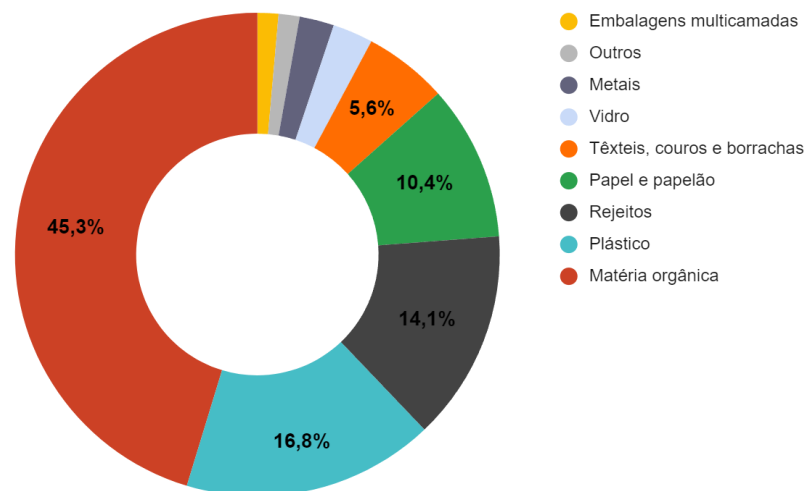
Os processos de conversão de resíduos em energia são chamados de *Waste to energy* (WtE), e podem realizar essa conversão através de processos térmicos ou bioquímicos. Entre

os processos bioquímicos está a digestão anaeróbia a partir de FORSU. Isso ocorre uma vez que boa parte da composição desses resíduos trata-se de resíduos alimentares e de jardinagem, que são a fração orgânica, detentora de macromoléculas como polissacarídeos, lipídios e proteínas utilizadas para o crescimento microbiano e para o processo de DA que produz o biogás (Ram et al, 2021).

Os RSU podem ser definidos como resíduos sólidos não perigosos, biodegradáveis/não biodegradáveis, carbonáceos/não carbonáceos e reutilizáveis ou inutilizáveis que são gerados em residências, escritórios, comércio, jardim, quintal e rua (Ram et al, 2021), e consistem em resíduos de alimentos, papel, vidro, metais, plásticos, têxteis, entre outros, provenientes do consumo diário humano.

Observam-se variações nas características dos RSU em todo o mundo de acordo com a cultura e população local (Logan et al., 2019). Os resíduos gerados em países desenvolvidos apresentam maior diversificação, com uma parcela maior de papel e plásticos, já nos países em desenvolvimento a maior proporção é de resíduos orgânicos de restos de alimentos (Logan et al., 2019). No Brasil 45% dos resíduos sólidos urbanos são de matéria orgânica, sendo essa composta majoritariamente por resíduos alimentares (ABRELPE, 2020) (Figura 2.2).

Figura 2.2. Composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos no Brasil

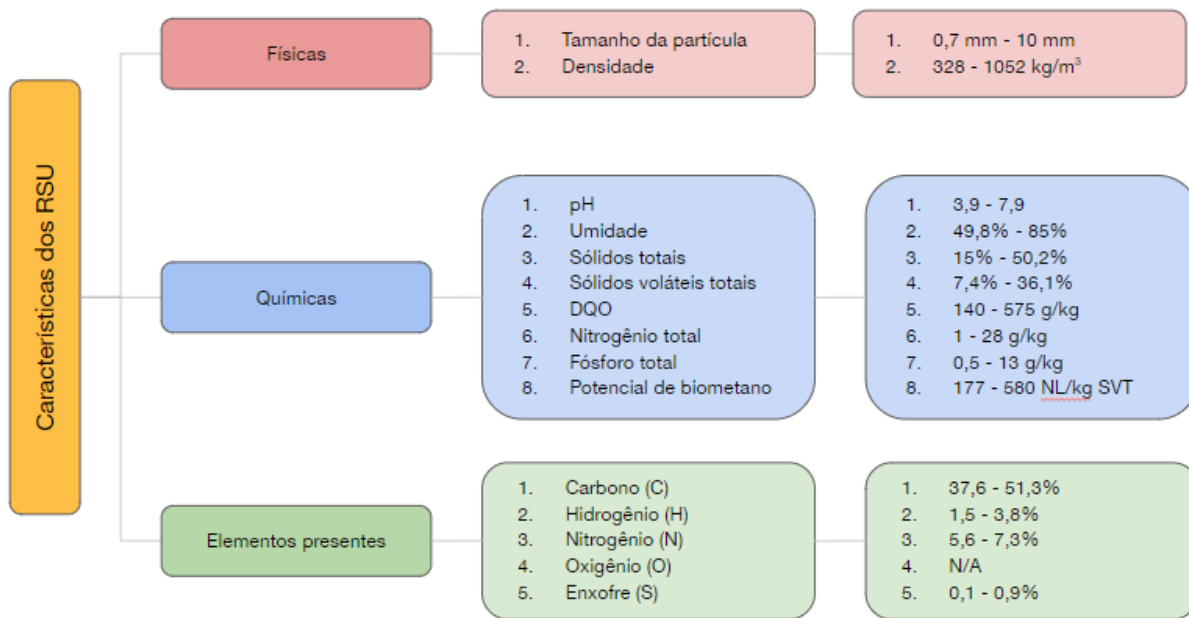


Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2020

Pela diversidade entre os RSU de todo o mundo, é muito importante que seja realizada uma etapa de caracterização para determinar a tecnologia de conversão em energia adequada e viável para estes resíduos. As características dos RSU não podem ser generalizadas ou fixadas em uma condição específica, estas possuem diversas frações de composição química que influenciam na variabilidade do potencial bioenergético (Zamri et al., 2021).

A caracterização física dos RSU é analisada pelos parâmetros tamanho e densidade das partículas, enquanto para caracterização química são analisados os parâmetros pH, umidade, sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total (NT), fósforo total (TP) e potencial de biometano. Além disso, são analisados os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O) e enxofre (S) presentes nos RSU (Zamri et al., 2021). A Figura 2.3 traz as faixas recomendadas destes parâmetros para o processo de conversão bioquímica da FORSU em energia.

Figura 2.3. Caracterização geral de resíduos sólidos urbanos



Fonte: Adaptado de Zamri et al., 2021

As FORSU quando submetidas a decomposição aeróbica sem gerenciamento podem prejudicar o meio ambiente, poluindo o solo e a água, e agravar a emissão de gases de efeito

estufa com a produção de metano em sua decomposição (Logan et al., 2019; Sfetsas et al., 2022).

Logo depois da agricultura, temos os resíduos como principais responsáveis pela emissão de metano no Brasil, onde o metano é gerado em aterros sanitários quando os materiais orgânicos se decompõem (Our World in Data, 2022), reforçando o fato da importância do gerenciamento deste resíduo.

2.2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO MUNDO E NO BRASIL

Aproximadamente 1,3 bilhões de toneladas dos alimentos produzidos no mundo para consumo humano são desperdiçados. Na Europa e na América do Norte entre 95 e 115 kg de alimentos por pessoa são desperdiçados por ano. O total de alimentos desperdiçados e sua decomposição representa de 6 a 10% das emissões de gases do efeito estufa gerados pelo homem (Stoknes et al., 2016).

O descarte de RSU é um problema em escala global. É estimado que a geração de RSU aumente cerca de 2,2 bilhões de toneladas com o custo de gestão associado de US\$375,5 bilhões até 2025 (Logan et al., 2019). O desperdício de alimentos domésticos tende a aumentar de 17% dos alimentos comprados em 2013 para 26% em 2050 (Tampio et al., 2021).

No Brasil a geração de RSU aumentou de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano de 2010 a 2019, e a previsão é de aumento de 50% até 2050 (ABRELPE, 2020).

Em 2010 o governo brasileiro promulgou a lei 12.305, que estabelece a Política Nacional de Saneamento Básico (PNRS), marco regulatório que prevê a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos. Segundo a PNRS os municípios passam a ser responsáveis pelos resíduos gerados em seus territórios e devem elaborar um Plano Municipal de Gerenciamento Integrados de Resíduos Sólidos (PMGIRS) (Nascimento et al., 2015).

Apesar da promulgação da PNRS em 2010, ainda é difícil quantificar os RSU gerados per capita no Brasil, pois a insuficiência de gestão e coleta pública impedem a quantificação assertiva desses resíduos (IPEA, 2012). Cerca de 19,7% dos resíduos gerados no Brasil não são recolhidos (Nascimento et al., 2015). Por conta disso, em 2020 a PNRS foi atualizada de forma a taxar municípios que não cumpram com as determinações de gestão e tratamento de seus RSU, com isso os programas de coleta e gestão de resíduos estão finalmente evoluindo gerando demanda para novas alternativas de tratamento e manejo de RSU (ABRELPE, 2020).

O setor de resíduos é, portanto, transversal a diversas questões ambientais, sociais e econômicas e, apesar do impacto subestimado, sua contribuição para mitigação das mudanças climáticas é considerável, além de ser um potencial contribuinte para compensação junto a outros setores (ABRELPE, 2020).

2.2.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As práticas convencionais de gestão de RSU atuais envolvem coleta de resíduos, tratamento por compostagem, incineração e disposição em aterros sanitários (Logan et al., 2019). Entre as novas tecnologias de gestão de RSU temos o conceito de WtE, onde a FORSU é convertida em energia, os processos mais comuns para esse fim são os sistemas de captura de metano em aterros sanitários e a DA de FORSU que produz biogás.

No Brasil, alguns aterros sanitários possuem um sistema de captura e aproveitamento do biogás produzido pela matéria orgânica, porém esses sistemas ainda não são uma realidade em todas as unidades (ABRELPE, 2020). Os aterros sanitários que possuem esse sistema, viabilizam a captação de chorume e gases liberados pelos resíduos, no caso dos gases, existe um mecanismo de captação dos gases liberados pela fermentação e decomposição da matéria orgânica. Porém é importante ressaltar que os aterros sanitários possuem uma quantidade determinada de lixo que pode ser depositada, sua construção exige grandes extensões de terra e eles ainda geram grande impacto ambiental por meio de vazamentos de líquidos e gases que contaminam lençóis freáticos e aquíferos, além de possuírem alto custo econômico na implantação e na manutenção (TM, 2022).

Entre os tratamentos utilizados para a FORSU está a compostagem, porém em 2011 apenas 211 municípios brasileiros possuíam unidades adequadas de compostagem. No mesmo ano foram tratados apenas 5% de toda matéria orgânica produzida no Brasil. A principal dificuldade encontrada no tratamento se deve a etapa de coleta, onde os resíduos não são separados entre orgânicos e não-orgânicos, dificultando o processo e aumentando a contaminação, muitas vezes inviabilizando o tratamento destes resíduos (Nascimento et al., 2015). Com a evolução da coleta seletiva e o crescimento da compostagem doméstica o cenário do descarte correto de resíduos vem melhorando ao longo dos anos, porém o descarte inadequado ainda representa uma parcela considerável do total, ficando este em 40,5% em 2019.

A DA é considerada uma das práticas alternativas mais promissoras atualmente para a gestão de FORSU, devido ao fato de ser um processo que resulta em uma bioenergia de alto valor agregado, o biogás, diversos países passaram a tomá-lo como alternativa sustentável para destinação de FORSU (Barua et al, 2021), porém no Brasil a prática ainda se encontra em estágios iniciais.

Avaliando o cenário atual apresentado, se faz necessária uma mudança de paradigma no comportamento do consumidor, de forma que esse, consuma de forma mais consciente evitando o desperdício, mas além disso os RSU desperdiçados podem ser reciclados na produção de energia e fertilizantes para produção agrícola, fechando assim o ciclo de desperdício (Song et al., 2021). É necessário que os resíduos passem de passivos para recursos ativos, com potencial de reutilização e aproveitamento do potencial energético (Logan et al., 2019), e a DA de FORSU se mostra o caminho ideal para isto.

2.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA

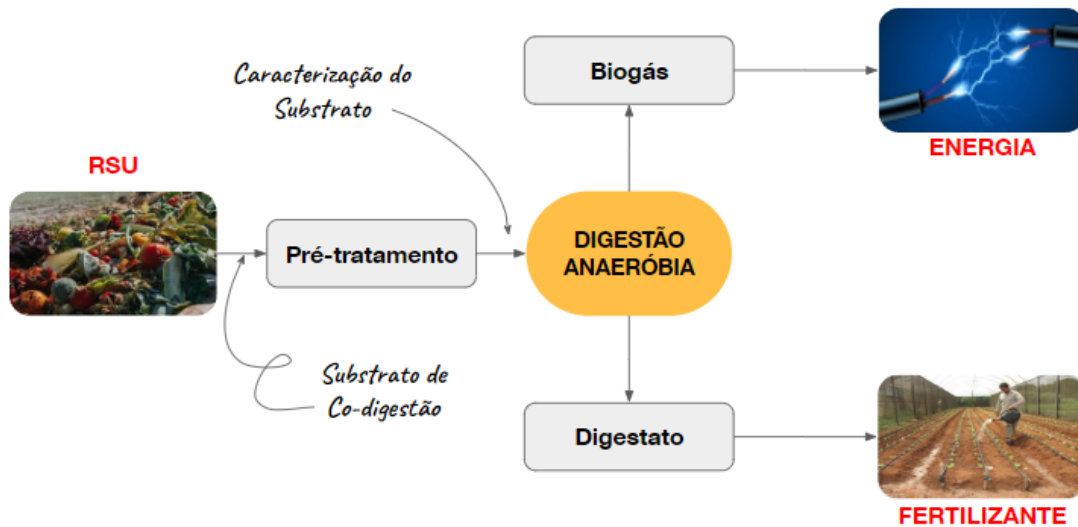
A produção de biogás por digestão anaeróbia de FORSU está na linha de frente das pesquisas de energia alternativas (Owamah et al., 2014). A DA transforma os resíduos orgânicos em energia, minimizando o impacto ambiental dos mesmos e aumentando a reutilização, criando uma produção circular (Sfetsas et al., 2022).

A FORSU é um substrato ideal para a digestão anaeróbia devido ao seu alto teor de água, biodegradabilidade e alto potencial de produção de metano (Lu et al., 2021). Em comparação com os tratamentos convencionais, incineração e aterros sanitários, a digestão anaeróbia é uma alternativa mais favorável do ponto de vista ambiental (Peng et al, 2020).

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico que ocorre na ausência de oxigênio, onde materiais orgânicos e biodegradáveis, são transformados em biogás, rico em metano, e o produto secundário chamado de digestato ou digerido, este rico em nutrientes como carbono e fósforo (Timonen et al., 2019).

O processo da digestão ocorre em quatro etapas principais: (1) hidrólise, (2) acidogênese (formação de ácido), (3) acetogênese e (4) metanogênese (produção de gás) (Meegoda et al., 2018). Antes das etapas principais temos a etapa adicional de caracterização e pré-tratamento dos substratos (Figura 2.4).

Figura 2.4. Fluxograma simplificado do processo de digestão anaeróbia e produtos



Fonte: Adaptado de Kumar et al., 2020

A digestão anaeróbia, possibilita a reutilização de FORSU, que seria descartada, como substrato, aproveitando assim nutrientes valiosos para geração de energia. O processo ajuda na remoção de patógenos e substâncias estabilizadoras que podem causar danos ao meio ambiente (Logan et al., 2019).

A DA pode ter um papel importante no cumprimento das metas internacionais de redução do efeito estufa, auxiliando na redução das emissões de gases do efeito estufa, com a reutilização de FORSU gerador de metano e por ser uma fonte de energia renovável que diminui a utilização de combustíveis fósseis. A utilização da DA como fonte energética auxilia também na meta de aumento de 27% na participação de energia renovável e melhoria de 27% na eficiência energética da União Européia (UE) (Timonen et al., 2019).

Em alguns países da UE, a digestão anaeróbia é a tecnologia recomendada para a higienização de FORSU de supermercados, catering e resíduos de cozinha, e sua utilização vem aumentando nos últimos anos (Sanchez-Rodriguez et al., 2018).

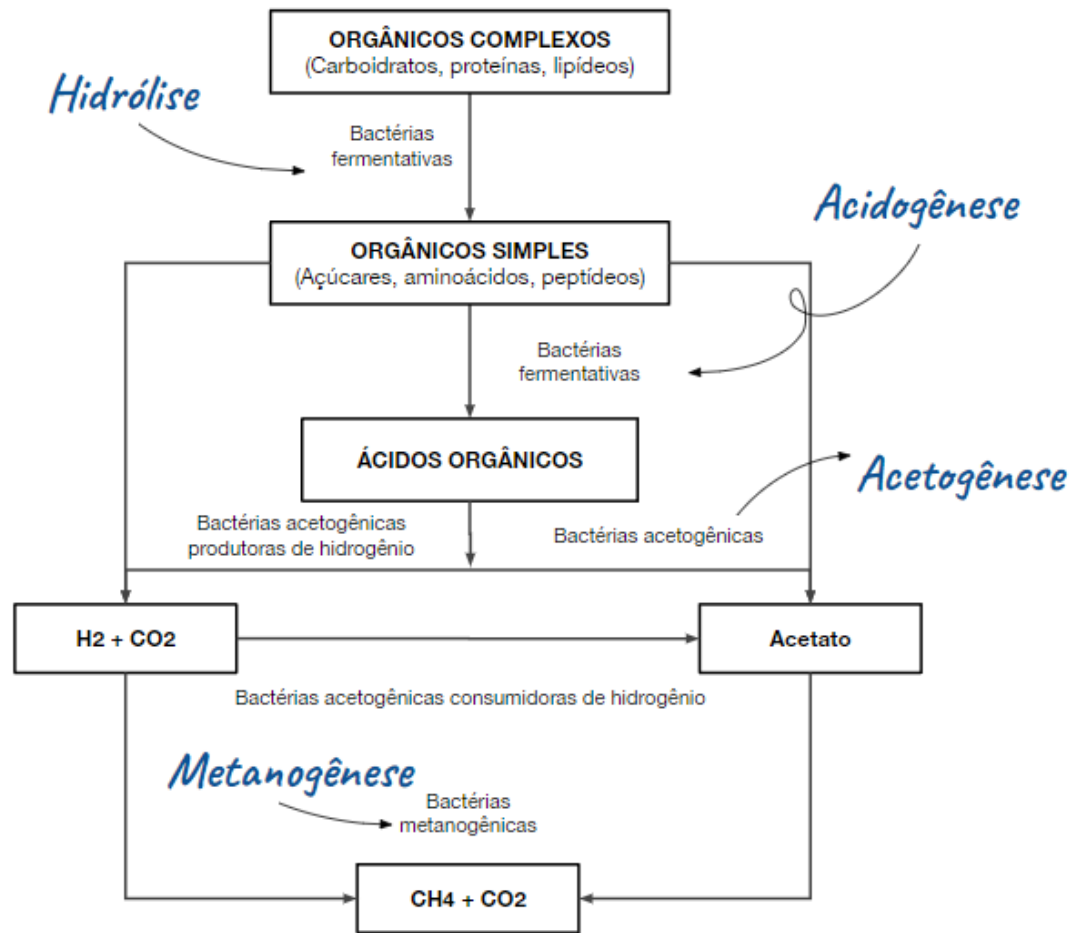
2.3.1. ETAPAS DA DIGESTÃO

A digestão anaeróbia é um processo que ocorre em ambientes onde íons sulfato e CO₂ estão presentes, não ocorre em ambientes que contém oxigênio, nitrato e sulfato. A digestão acontece em duas macro etapas, a primeira onde os compostos orgânicos são convertidos em moléculas mais simples, principalmente ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono e gás hidrogênio, e a segunda etapa onde os produtos da etapa anterior são convertidos em metano (CH₄), e dióxido de carbono (CO₂) (Chernicharo, 2007).

A primeira etapa possui três sub etapas, sendo a primeira a hidrólise, seguida pela acidogênese e a acetogênese. A segunda etapa é chamada de metanogênese, processo responsável pelo consumo de H₂, cujo aumento de concentração inibe a atividade da acidogênese e acetogênese (Chernicharo, 2007). A Figura 2.5 mostra o fluxograma com cada uma das sub etapas da digestão.

A DA pode ser realizada como processo úmido ou seco, mesofílico e termofílico, descontínuo ou contínuo, estágio único ou multiestágio com co-digestão ou mono digestão, e todos esses fatores influenciam nas características do biogás e do digestato. O teor de umidade do digestato é influenciado pela escolha entre um processo úmido ou seco, quando a DA é seca o digestato chega a ter entre 30-40% de sólidos totais, e geralmente não requer um processo de separação sólido-líquido (Logan et al., 2019). Outros fatores influenciam a DA de forma a tornar o processo mais controlado e/ou estável, como também direcioná-lo para que sejam favorecidas as rotas de maior interesse, entre esses fatores, destacam-se temperatura, pH, razão carbono/nitrogênio (C/N) do substrato, presença de micro e macronutrientes, compostos inibidores e se o processo será úmido ou seco.

Figura 2.5. Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos nas etapas da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado Chernicharo (1997)

2.3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COMO SUBSTRATOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

As condições de operação e o substrato utilizado na digestão anaeróbia afetam as características da matéria seca (MS) no efluente e o rendimento de biogás do processo. Segundo Lu et al. (2021), o valor de sólidos totais (ST) de efluentes provenientes da DA de FORSU e outras biomassas variou entre 1% e 35% em associação com diferentes matérias primas, tipo de reator e condições operacionais.

A disponibilidade de elementos que fornecem nutrientes aos microrganismos na digestão anaeróbia desempenha um papel importante no desempenho e estabilidade dos

digestores de FORSU. A falta de nutrientes pode afetar as funções e atividades de enzimas-chave, e alterar as condições ambientais para o crescimento microbiano (Romero-Güiza et al., 2016; Xu et al. 2018).

Entre os RSU temos a fração orgânica dos RSU (FORSU) e resíduos de poda e capina. A FORSU pode ser originada da preparação de alimentos ou mesmo de restos de frutas e vegetais, eles são considerados altamente biodegradáveis, possuem alto teor de umidade, pH ácido e alto teor de orgânicos solúveis, o que pode aumentar o rendimento energético do processo de DA. A aplicação de FORSU como substratos da DA pode ser dificultada pela sua composição química inconsistente devido à sua natureza heterogênea (Bong et al., 2018). Porém a co-digestão de FORSU com outros resíduos, como poda e capina, auxiliam na estabilização do substrato, proporcionando maior eficiência e previsibilidade no processo.

Para termos uma biomassa de qualidade para a DA é necessário que sejam consideradas questões logísticas como abastecimento sazonal de resíduos, armazenamento, opções de pré-tratamento e condições de degradação da matéria orgânica (Bong et al., 2018).

A FORSU é conhecida por possuir algumas propriedades que não são favoráveis ao processo de digestão anaeróbia, incluindo baixos valores de pH, alto teor de nitrogênio e baixa relação C/N (Zhang et al., 2014). Nesse contexto a co-digestão com outros resíduos tem sido estudada como possibilidade de melhora na relação C/N do sistema e nas condições para o desenvolvimento de microrganismos anaeróbios e, como consequência, o aprimoramento da produção de biogás (Oleszek et al., 2014).

2.3.3. ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DE FORSU

Um dos principais fatores a ser controlado na DA é o equilíbrio C/N. O carbono fornece energia para os microrganismos da reação enquanto o nitrogênio fornece nutrientes. Um baixo valor da relação C/N resulta na deficiência do processo de desnitrificação, não sendo removido então todo o nitrogênio no processo, causando um acúmulo de amônia e consequentemente queda do pH na reação, causando a falha do processo (Zhang et al., 2020).

A FORSU é caracterizada como uma biomassa com alto teor de sólidos totais e alta biodegradabilidade, porém possuem baixa relação C/N, por terem excesso de nitrogênio e pouco carbono na composição (Bong et al., 2018).

Para aumentar o rendimento energético da DA de FORSU com alto teor de nitrogênio, se faz uso da co-digestão dos mesmos com outros resíduos orgânicos que tenham alto teor de carbono, equilibrando assim a razão C/N do processo.

A co-digestão é um processo em que dois substratos são anaerobiamente digeridos para a produção de bioenergia. Além de equilibrar a relação C/N do processo, a co-digestão ajuda na diluição de substâncias tóxicas, balanço de nutrientes, capacidade de tamponamento, e maior rendimento de metano. (Brown e Li, 2013).

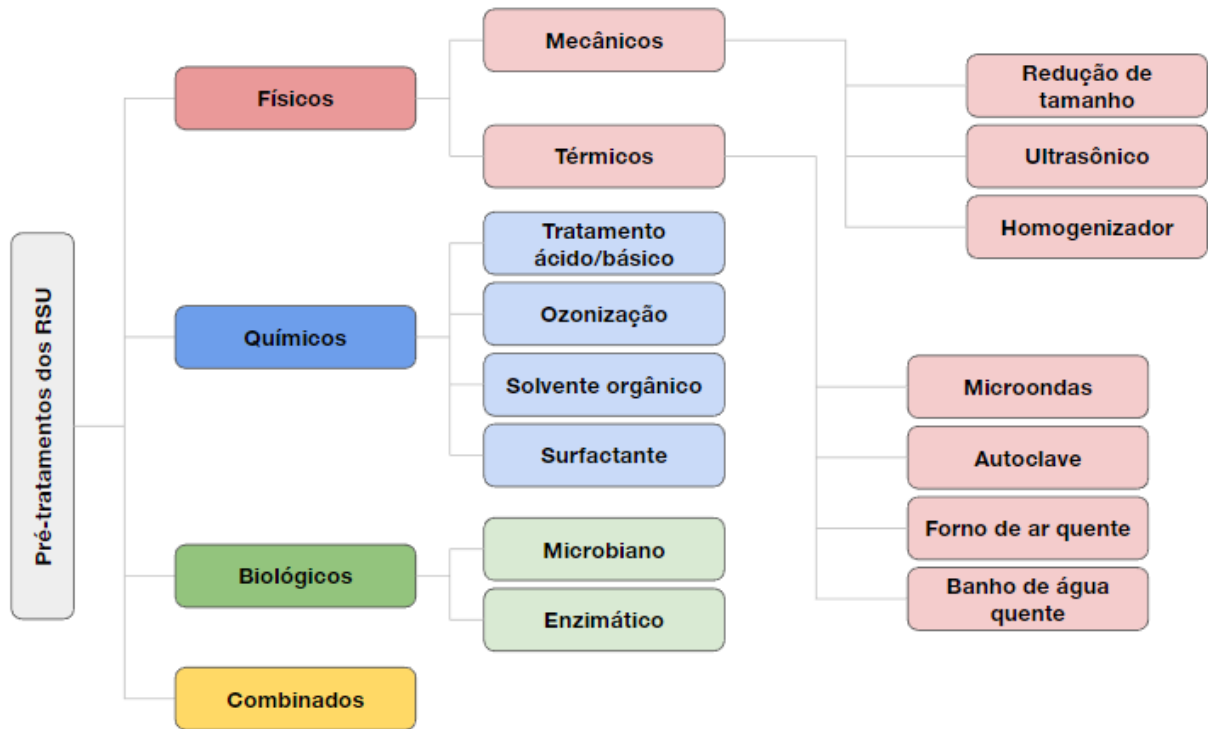
Os melhores substratos na co-digestão com FORSU são de origem vegetal, classificados como biomassa lignocelulósica por serem compostos por celulose, hemicelulose e lignina e assim, possuem alto teor de carbono. Essa biomassa é encontrada em resíduos descartados por indústrias de madeira, papel e celulose, e por podas ocasionais de vegetação, exemplos desse tipo de resíduo são folhas, galhos, cascas e partes de madeira que não são aproveitadas como as pontas e tocos que permanecem após o corte (Nakaema, 2021).

2.3.4. PRÉ-TRATAMENTOS DE FORSU NA DIGESTÃO ANAERÓBIA

O pré-tratamento dos substratos antes da digestão anaeróbia melhora a taxa de decomposição da fração orgânica durante o processo, por quebrar as moléculas em partículas menores, resultando em um maior rendimento de biogás e um digestato mais estabilizado (Kumar et al., 2020).

Na literatura diferentes técnicas de pré-tratamento vêm sendo aplicadas às FORSU da DA, podemos classificá-las em tratamentos químicos, físicos, biológicos e combinados. O pré-tratamento mais adequado é selecionado com base nas características do substrato, mecanismo de pré-tratamento, requisitos finais do produto e viabilidade econômica (Kumar et al., 2020). A Figura 2.6 destaca as diferentes técnicas de pré-tratamento que podem ser utilizadas no substrato da DA.

Figura 2.6. Técnicas de pré-tratamento dos FORSU da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Kumar et al., 2020

A escolha do método de pré-tratamento deve considerar os efeitos sobre o rendimento dos monômeros de açúcar fermentáveis, evitar a degradação dos açúcares derivados das hemiceluloses e minimizar a formação de compostos inibidores da fermentação. Outro fator relevante na escolha do método é a relação dos custos para implementação, visto que o pré-tratamento é uma etapa que encarece o processo.

Os métodos de tratamento físicos e químicos são mais amplamente utilizados em comparação com outros métodos, porque são simples, rápidos e eficazes, muitas vezes são utilizados de forma combinada de forma a melhorar a biodegradabilidade da FORSU. Entre os tratamentos físicos os mais utilizados para FORSU são os tratamentos mecânicos que buscam reduzir o tamanho das partículas e homogeneizar a mistura, entre os tratamentos químicos o mais utilizado é o pré-tratamento alcalino com solução de NaOH que ajuda a manter o pH do digestor neutro (Kumar et al, 2020).

2.3.5. PRODUTOS DA DIGESTÃO A PARTIR DE FORSU

Os produtos provenientes da digestão anaeróbia são o biogás, composto por gás metano e dióxido de carbono em concentrações nas faixas de 50-70% e 30-50% respectivamente, o efluente sólido/líquido denominado digestato ou digerido, composto por nutrientes orgânicos restantes do processo da digestão (Zamri et al., 2021), e ácidos carboxílicos.

O biogás proveniente da DA também pode conter traços de outros gases como nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, vapor de água, compostos orgânicos voláteis (COV), siloxanos, monóxido de carbono e amônia em frações minúsculas. O digestato também pode conter impurezas como metais pesados e outros compostos mineralizados. Portanto, geralmente é necessário um processo de pós-tratamento dos produtos dependendo da aplicação dos mesmos (Zamri et al., 2021).

2.3.5.1. BIOGÁS

O biogás é o principal produto da DA, seu principal composto, CH_4 , possui um alto poder calorífico com grande potencial energético. Com a necessidade de novas fontes de energia renováveis o biogás vem ganhando espaço nos últimos anos. Em 2018, um estudo da Associação Brasileira do Biogás (ABiogás, 2020) indicou que o Brasil é o país com o maior potencial de produção de biogás do mundo, com uma produção de aproximadamente 84,6 bilhões de metros cúbicos/ano.

Dependendo da FORSU e condições de operação da DA o biogás gerado pode conter uma alta concentração de CO_2 (30-50%), que possui um baixo poder calorífico (LHV), assim um dos primeiros pós-tratamentos aplicados para o enriquecimento do biogás é a remoção do CO_2 (Brigagão et al, 2019).

Após purificado o biogás pode ter diferentes aplicações, atualmente é utilizado em cinco principais: produção de H_2 a partir do biogás; eletricidade e geração de energia com produção combinada de calor e energia; injeção nas redes de gás natural após modificado; e produção de calor e vapor; como combustível veicular após ser purificado e comprimido (Khan et al, 2017).

Na maioria dos países em desenvolvimento, o biogás é utilizado em cozinhas e iluminação de residências. O biogás também é utilizado a nível industrial, como combustível de caldeiras para produção de vapor, neste caso o biogás não necessita de purificação prévia

(Khan et al, 2017). Já o biogás purificado vem sendo injetado nas redes de gás natural da Europa, países como Suécia, Alemanha, Suíça e França estabeleceram seus próprios padrões para injeção de biogás nas redes de gás natural para evitar corrosão dos equipamentos. Atualmente, o H₂ produzido a partir do biogás é utilizado em células de combustível à base de hidrogênio, que convertem o H₂ em eletricidade a nível comercial. Suécia e Alemanha estão entre os países que já utilizam o biogás como combustível veicular na forma de metano puro ou misturado com gás natural.

2.3.5.2. DIGESTATO

O digestato é um subproduto efluente dos digestores, é a matéria orgânica restante do processo de digestão. Atualmente o digestato vem sendo um gargalo da produção de energia por DA, e seu rendimento de matéria orgânica por tonelada de substrato de FORSU é estimado em 0,20-0,47 toneladas (Ren et al., 2018).

Por conter nutrientes valiosos na sua composição como nitrogênio, fósforo e matéria orgânica, o digestato pode ser utilizado como fertilizante orgânico, condicionador de solo e como cobertura de aterros (Lu et al., 2021). Os nutrientes são conservados durante a DA, mas são convertidos em uma forma mais orgânica, o que aumenta sua disponibilidade de absorção como fertilizante (Logan et al., 2019).

Apesar da possibilidade do digestato ser usado na sua forma completa após a digestão anaeróbia, para melhor aproveitamento de seus nutrientes e menor impacto ambiental, se faz necessário o uso de pré-tratamentos de separação sólido líquido, estabilização e recuperação de nutrientes antes da sua aplicação como biofertilizante e outros produtos.

2.4. CARACTERIZAÇÃO DO DIGESTATO

Os parâmetros observados na caracterização do digestato são: teor de matéria seca, pH, sólidos totais, matéria orgânica (MO), sólidos voláteis (SV), carbono total (CT), nitrogênio de Kjeldahl total (NKT), nitrogênio amoniacal total (NAT), nitrogênio total (TN), fósforo total (TP), potássio total (TK), enxofre, magnésio, cálcio, metais pesados, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e presença de patógenos (Sfetsas et al., 2022).

O tipo de substrato e condições de operação da DA afetam as características do digestato. Segundo Sheets et al., a quantidade de ST presente no digestato proveniente da DA de FORSU e outras biomassas varia entre 1% e 35%, dependendo do tipo de material co-digerido, tipo de reator e condições de operação. O teor de metais pesados no digestato proveniente de resíduos alimentares é significativamente menor que o de lodo de esgoto e esterco.

Mesmo entre os digestatos provenientes da digestão de FORSU temos uma grande variação nas características essenciais. Por exemplo, FORSU com maior teor de resíduos vegetais produz menos nitrogênio que FORSU com maior teor de alimentos e compostos orgânicos mistos (Lamolinara et al., 2022).

2.5. MANEJO E APROVEITAMENTO DO DIGESTATO

Com o aumento das plantas de biogás e a adoção da DA como tratamento de FORSU, o descarte e a utilização do efluente da digestão se torna um problema proeminente (Bong et al., 2018). Porém devemos olhar para o digestato não como um problema, ou resíduo a ser tratado e descartado, mas sim como um subproduto valioso da usina de biogás, visto que existem diversas opções para o digestato ser transformado e agregado no mercado (Shanta et al., 2021).

Devido a variabilidade de nutrientes no digestato, e sua variação de composição com dependência do substrato e parâmetros de digestão, o digestato não deve ser descartado de forma imediata no meio ambiente, necessitando previamente de uma caracterização e possivelmente pós-tratamento do mesmo.

O teor médio de umidade do digestato é de 70 a 80% (Tampio et al., 2016). As atuais estratégias de uso dessa fração líquida do digestato apresentam riscos significativos ao meio ambiente se utilizados diretamente para fins agrícolas como melhorador de solo (Joshua et al., 2021).

Entre os exemplos de impactos causados pelo descarte inadequado do digestato, podemos citar a liberação de amônia no solo e ambientes aquáticos, no primeiro causando desequilíbrio dos nutrientes presentes na terra e liberação de mau odor, e no segundo aumentando a demanda de oxigênio do meio, diminuindo a concentração do mesmo e prejudicando a vida local (Kunz et al, 2019).

Outro desafio encontrado na gestão do digestato é sua alta demanda de espaço e dificuldade de transporte na forma pura. Em um quadro global, cerca de 0,64 bilhões de toneladas de resíduos sólidos seriam gerados a partir da DA de FORSU anualmente, se a alternativa de descarte deste resíduo for a incineração, seriam necessários 44,8 bilhões de kWh de energia elétrica, com geração de 217 milhões de toneladas de emissão de dióxido de carbono, demandando um espaço equivalente a 11.786 piscinas olímpicas para deposição das cinzas, o que tornaria a DA para produção de energia um processo inviável econômica e ambientalmente (Ma et al., 2020; Zamri et al., 2021).

A partir dos desafios de manejo apresentados, surge a necessidade de técnicas de pós-tratamentos a serem aplicadas ao digestato para que possibilitem sua aplicação de forma a melhorar o ambiente e que tragam maior rentabilidade econômica. Para definição do tratamento adequado é necessário que seja feita a caracterização do digestato, identificando compostos presentes e as concentrações de cada um.

As legislações ao redor do mundo, principalmente na União Européia tem se tornado mais exigentes quando a caracterização do digestato da DA e fertilizantes provenientes do mesmo, com isso é necessária que a caracterização desse efluente seja cada vez mais rigorosa (Herbes et al., 2020).

2.6. PÓS-TRATAMENTOS DO DIGESTATO

O digestato efluente da DA é uma mistura sólido-líquido, para seu melhor gerenciamento, variabilidade de aplicação e otimização de resultados com a utilização, ocorre a separação em duas frações, resultando em uma fração sólida e uma fração líquida. com a separação temos também maior eficiência logística, sendo necessários menos requisitos de equipamentos de processamento e armazenamento (Sfetsas et al., 2022).

A separação das frações do digestato é um processo econômico e deve ser o primeiro tratamento aplicado ao digestato cru. O processamento de separação adequado do digestato depende das características físico-químicas do mesmo, e seu uso final. Podemos classificar os diferentes processos em: biológicos, físicos, e químicos.

Alguns desses processos são caros devido aos seus altos requisitos de energia, baixa eficiência, ou por ainda estarem em fases iniciais de desenvolvimento (Lamolnara et al., 2022), principalmente os processos químicos e biológicos. Sendo assim, os processos físicos

são considerados os mais promissores para separação sólido-líquido do digestato, permitindo que as frações sólida e líquida sejam utilizadas separadamente de forma a otimizar e direcionar de forma mais adequada sua aplicação.

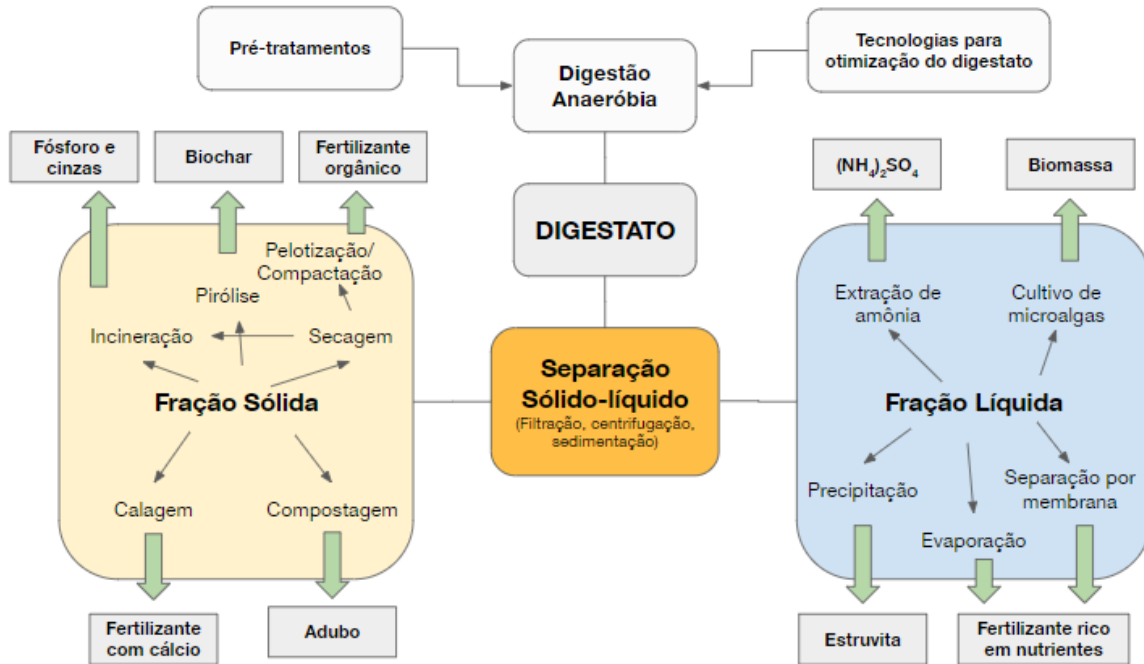
A fração líquida é rica em potássio, nitrogênio e outros minerais, podendo ser utilizada sozinha como fertilizante, no cultivo de microalgas ou na extração de estruvita e fosfato de amônio. A fração sólida é rica em carbono e fósforo, e pode ser utilizada para produção de biocarvão, bio-óleo, etanol, compostagem ou utilização como biofertilizante (Sfetsas et al., 2022; Peng e Pivato, 2019).

Para a utilização de ambas as frações como fertilizante, a separação possibilita a produção de fertilizantes com propósitos específicos o que pode aumentar o valor de mercado do produto (Song et al., 2021).

Após a separação a fração líquida do digestato ainda pode passar por outros processos para remover o excesso de água e concentrar os nutrientes, este processo reduz os custos de transporte e possibilita a utilização do produto em áreas mais distantes da área de produção que tem maior demanda de fertilizantes (Tampio et al., 2016). A mesma vantagem se aplica para o uso da fração sólida do digestato, esta, que possui maior facilidade de transporte e utilização. O esquema apresentado na Figura 2.7 mostra alguns dos processos de pós-tratamento e aplicações que podem ser utilizadas para cada fração do digestato após a separação.

Mesmo sendo alto o teor de fósforo solúvel na fração líquida do digestato, muitos estudos concluem que a fração sólida possui a maior fração de fósforo total. Em contrapartida a fração líquida do digestato possui o maior teor de nitrogênio (Sfetsas et al., 2022). Ambas as frações contêm minerais que as tornam valiosas fontes de nutrientes para fins de fertilização.

Figura 2.7. Processos de tratamento do digestato



Fonte: Adaptado de Sfetsas et al., 2022 e Logan et al., 2019

O pós-tratamento ideal para o digestato depende das características físico-químicas do mesmo e a intenção de uso como produto final. Os processos de tratamento do digestato podem ser classificados como biológicos (por exemplo compostagem, produção de biomassa), físicos (por exemplo desidratação, separação por membranas, combustão), químicos (por exemplo precipitação de estruvita, gaseificação) e combinados (por exemplo stripping de amônia e pirólise). Alguns destes tratamentos apesar de promissores ainda não são muito utilizados atualmente, por alta demanda energética, baixa eficiência, custo elevado e muitas vezes por estarem em fase de desenvolvimento, sendo aplicados apenas em pequena escala (Lamolinara et al., 2022). A Tabela 2.1 mostra um resumo das tecnologias mais relevantes e promissoras para o processamento do digestato atualmente, suas principais aplicações, características e desafios de utilização.

Tabela 2.1. Processos de pós-tratamentos do digestato

Tipo de tecnologia	Processo	Operação	Aplicação	Principais características do processo	Contras
Tratamento físico	Espessamento	Sedimentação Filtração Evaporação	Separação das frações líquida e sólida do digestato	Processo de separação físico simples com aumento da concentração da fração sólida	Necessidade de outros tratamentos para recuperação de nutrientes
Tratamento físico	Desidratação	Filtração a vácuo Screw press Secagem Centrifugação	Eliminação/separação da fração líquida e concentração da fração sólida do digestato	Processo de separação mecânico, no qual a fração sólida é concentrada sem a necessidade de aditivos químicos	Necessidade de outros tratamentos para recuperação de nutrientes
Tratamento físico	Separação por membrana	Microfiltração Ultrafiltração Nanofiltração Osmose reversa	Remoção de sólidos em suspensão, separação das frações líquida e sólida do digestato, concentração de nutrientes	Processo de separação físico simples no qual as partículas são separadas por seus tamanhos	Alta demanda de energia e manutenção. Necessidade de diferentes membranas com tamanhos de poros adequados.
Tratamento químico	Precipitação de estruvita	Magnésio Amônia Fosfato	Recuperação de nutrientes da fração líquida	Os precipitados podem ser utilizados diretamente como fertilizantes	Viabilização econômica
Tratamento físico - químico	Stripping de amônia		Remoção da amônia da fração líquida do digestato	A amônia pode ser recuperada em forma de sal e aplicada como fertilizante	Alta demanda de energia para o processo de adsorção e necessidade de produtos químicos para limpeza
Tratamento químico	Oxidação de amônia		Remoção da amônia da fração líquida do digestato	Oxidação da amônia em nitrato	Ainda não é aplicada em grande escala
Tratamento físico (térmico)	Combustão		Utilização da fração sólida para produção de energia	Queima da fração sólida para produção de calor	Prejudicial ao meio ambiente

Tratamento físico - químico	Pirólise		Biomassa é decomposta em diferentes produtos (biochar, bio-oil, syngas)	Os valores energéticos de produtos pirolisados são altamente competitivos no mercado e tem diversas aplicações, até mesmo como fertilizantes	Pouco aplicada em larga escala
Tratamento químico	Gaseificação		Produção de syngas, como hidrogênio, que pode ser utilizado para produção de energia	Alto potencial de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis	Pouco aplicada em larga escala
Tratamento biológico	Produção de biomassa	Cultivo de microalgas Produção de proteína de insetos	Processo biológico de recuperação de nutrientes do digestato	Controle de parâmetros ótimos para o processo como temperatura e iluminação	Necessidade de espaço físico e no caso do cultivo de microalgas controle de amônia para não inibir o crescimento das mesmas
Tratamento biológico	Compostagem		Processo de estabilização da fração sólida do digestato	Processo econômico de recuperação de nutrientes e estabilização do digestato para uso como fertilizante	Necessidade de espaço físico e alto controle dos parâmetros de operação

Fonte: Adaptada de Lamolinara et al., 2022

2.6.1. SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

A separação do digestato nas frações sólida e líquida diminui o volume do digestato a ser transportado, armazenado ou que vai passar por outro processo de tratamento. Com o volume do digestato reduzido são necessários menos equipamentos de processamento e armazenamento, economizando custos operacionais e logísticos. Outra vantagem da separação sólido-líquida é que os nutrientes agrícolas podem ser recuperados e aplicados separadamente de acordo com sua necessidade (Monfet et al., 2017).

Diversas tecnologias de separação sólido-líquido estão disponíveis no mercado, entre elas as centrífugas, filtros prensa (screw press, belt presses, drum presses) e peneiras, curvas e curvas de círculo duplo. A centrifugação e filtração são os processos mais utilizados atualmente, principalmente entre agricultores que precisam transportar o excesso de digestato para outras áreas (Logan et al., 2019), por sua facilidade de aplicação e baixo custo.

2.6.1.1. FILTRAÇÃO

A filtração é um dos processos mais utilizados para separação sólido-líquido do digestato de FORSU. Por definição, é um processo que tem como objetivo a separação de um sólido de um fluido líquido ou gasoso no qual se encontra suspenso. O fluido passa através de um meio poroso que retém o sólido formando a denominada torta (Blackadder, 2004). A parte líquida resultante da filtração é chamada de filtrado.

Os meios filtrantes considerados eficientes devem, segundo MacCabe et al. (1993): possuir boa retenção dos sólidos a serem filtrados sem impedir a passagem do fluido; fornecer um filtrado claro; possuir boa resistência química e física, sendo capaz de suportar as condições do processo; permitir que a torta seja retirada de forma limpa e completa; e ser de baixo custo (Rocha et al., 2019).

As tortas de filtração podem ser classificadas como compressíveis e incompressíveis. Na torta incompressível a resistência ao fluxo de um dado volume não é consideravelmente afetada, quer pela diferença de pressão da torta, quer pela velocidade de deposição do material. Na torta compressível o aumento da diferença de pressão causa a formação de uma torta mais densa com maior resistência (Foust, 1982).

Entre os tipos de filtros mais utilizados para a separação sólido-líquido do digestato de FORSU temos prensa parafuso (screw press) e o filtro prensa. A prensa parafuso é um

dispositivo simples, que realiza a filtração pressionando o digestato de encontro a uma tela ou filtro em um movimento lento e contínuo, a fração líquida é coletada através da tela e a fração sólida é retida na forma da torta de filtração, esse processo é frequentemente utilizado para materiais fibrosos e difíceis de prensar. O filtro prensa consiste em placas e quadros que se alternam em uma armação com uma bomba acoplada, e através de sucção leva o digestato para dentro do equipamento, cada placa do equipamento possui um elemento filtrante (lona) que retém os sólidos formando a torta de filtração e separando a mesma da fração líquida. Os filtros prensa e prensas parafuso são utilizados principalmente quando o digestato é rico em fibras, sendo a separação mais eficiente (Logan et al., 2019).

2.6.1.2. CENTRIFUGAÇÃO

As centrífugas são utilizadas em muitas estações de tratamento de resíduos municipais no mundo (Logan et al., 2019), atualmente vem sendo utilizadas também para tratamento do digestato de FORSU em grande escala (Sheets et al., 2015), e é um dos métodos mecânicos mais indicados para a separação sólido-líquido do digestato, por ser um método simples, de baixo custo, aplicável em grande escala e mais eficiente na retenção de sólidos do digestato se comparado com outros métodos. Lukehurst et al. (2010) e Rigby e Smith (2011) relataram que o TS médio na fração sólida do digestato de FORSU separado por centrifugação (22,3%) foi mais alto que o relatado nos processos de filtração por prensa parafuso (12,9%) e prensa de correia (8,7%).

Um desafio encontrado na aplicação do processo de centrifugação, e que vem sendo estudado nos últimos anos, é a possibilidade de aumento do crescimento de bactérias e patógenos durante o processo, aumentando o risco de contaminação do digestato, o que pode inviabilizar sua aplicação. Chen et al., 2011 sugeriram que a produção de odor durante o processo é um sinal de atividade microbiana que é induzida pelo aumento do cisalhamento dos níveis de oxigênio durante a centrifugação do digestato. Outro fator de aumento do crescimento de bactérias no processo é a elevação da temperatura dentro da centrífuga, por ser um sistema fechado a energia gerada é convertida em calor (Erkan et al., 2013)

A separação sólido-líquido do digestato acontece dentro da centrífuga por conta da aceleração centrífuga. Dentro do tambor de rotação da centrífuga, as partículas sólidas, de maior densidade, se movimentam para fora do eixo de rotação através da força centrífuga, desta forma, é formada uma camada de sedimentos na parede interna do tambor da centrífuga

(Flottweg, 2022). A fase líquida separada escoo para a extremidade cilíndrica do tambor e é descarregada através de aberturas na tampa do tambor (Flottweg, 2022).

A camada de sedimentos formada na centrífuga é a torta sólida, ou fração sólida, do digestato, e pode ser aplicada direto no solo, sem necessidade de outros tratamentos, porém, apesar da possibilidade de ser aplicada dessa forma, dependendo da caracterização da torta, quantidade de nutrientes e patógenos, também podem ser aplicados outros tratamentos que estabilizem e aumentem o valor da fração sólida como a secagem e a compostagem.

Muitas vezes o processo de centrifugação é necessário como pré-tratamento de outros processos, como na compostagem onde existe uma necessidade de que a umidade no digestato esteja na faixa de 40% - 60%. Lin et al., 2014, centrifugaram o digestato de FORSU até chegar a 30% de TS, antes da compostagem do mesmo, para ajustar o teor de umidade necessário para o processo.

A fração líquida também é um produto da centrifugação, e a separação da mesma por centrifugação é essencial antes da aplicação de outros tratamentos, de forma que aumentem a eficiência dos mesmos. Os tratamentos de redução de amônia e DQO por exemplo, necessitam que a fração líquida tenha baixo teor de sólidos totais, para isso podem ser adicionados agentes precipitantes durante a centrifugação, para aumentar sua eficiência (Sfetsas et al., 2022).

2.6.2. FRAÇÃO LÍQUIDA DO DIGESTATO

A composição do digestato líquido depende das características do substrato utilizado na DA, assim como da biodegradabilidade e processo de fracionamento do digestato cru (Song et al., 2021). Geralmente possui um teor de sólidos totais menor que 3% (Fuchs e Drosch, 2013), e seu pH geralmente varia entre 6,7 e 9,2 e é afetado pela origem do substrato da DA (Xia e Murphy, 2016). Substratos ricos em nitrogênio resultam em aumento do pH devido ao acúmulo de amônia. Ao contrário, substratos ricos em matéria orgânica resultam em diminuição do pH devido ao acúmulo de ácidos graxos (Sfetsas et al., 2022).

Cerca de 70 a 80% dos nutrientes solúveis de nitrogênio e fósforo ficam retidos na fração líquida (Tambone et al., 2017).

Os principais desafios de utilização da fração líquida do digestato é seu manejo, transporte e armazenamento, por seu estado físico líquido existe muita dificuldade logística e encarecimento do processo para aplicação em áreas distantes da qual foi realizada a DA.

A fração líquida do digestato é considerada um bom fertilizante para irrigar diretamente as terras agrícolas (Monfet et al., 2017). Segundo relatório da UE de Saveyn e Eder (2014) mais de 95% do digestato produzido na Europa é utilizado na agricultura como fertilizante líquido, e menos de 3% é processo em produtos avançados.

A aplicação direta da fração líquida do digestato, sem tratamento adequado, pode gerar grandes problemas ao meio ambiente, entre eles a volatilização do nitrogênio, poluição por patógenos, excesso de fertilização e perda de nutrientes (Lu et al., 2021).

Entre os tratamentos utilizados atualmente na fração líquida do digestato para recuperação de nutrientes e produção de produtos mais ricos podemos citar, cristalização de estruvita, concentração de membrana, oxidação anaeróbia de amônia, cultura de microalgas, evaporação, separação de membranas, e combinações entre eles (Lu et al., 2021; Tampio et al., 2016). Algumas pesquisas foram realizadas com objetivo de estudar a eficiência de se misturar a fração líquida do digestato com cinzas de palha para manter a fertilidade de terras agrícolas (Yu et al., 2010).

Outras das tecnologias de tratamento da fração líquida do digestato podem demandar uma infraestrutura complexa e de grande escala, portanto devem ser avaliados a viabilidade econômica e aplicação do produto final (Lu et al., 2021).

A fração líquida é tratada de forma a possibilitar sua utilização como fertilizante, e outros produtos de valor, como a produção de biomassa, sem geração de impacto ambiental, recuperando de forma eficiente os nutrientes presentes na mesma. Os tratamentos utilizados na fração líquida do digestato de FORSU são diversos, e os mais utilizados atualmente são a separação por membranas, que possibilita a separação de diferentes de tamanhos de partículas presentes no digestato, o stripping de amônia, que recupera a amônia livre presente na fração líquida e produz um fertilizante líquido e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ sólido que pode ser utilizado como fertilizante, e o cultivo de microalgas que tem se provado um tratamento promissor para produção de biomassa com diversas aplicações no mercado.

2.6.3. TRATAMENTO DA FRAÇÃO LÍQUIDA

2.6.3.1. SEPARAÇÃO POR MEMBRANA

A separação por membranas é um processo em que através de uma barreira física é possível concentrar as substâncias desejadas em tamanhos menores e separar os nutrientes de forma seletiva (Masse et al., 2007). A barreira contém poros que separam as duas fases do líquido pelo tamanho dos sólidos presentes no meio, é exercida uma pressão de um dos lados da membrana e somente as partículas menores que os poros são transportadas para o outro lado.

O tratamento do líquido de interesse pela filtração por membrana resulta em duas frações tratadas, o permeado, que passa pelos poros da membrana com baixo teor de sólidos, e o concentrado, que possui maior teor de sólidos. Esta separação é um processo puramente físico, não requer aditivos químicos, por conta disso é amplamente utilizada na indústria (Sfetsas et al., 2022).

O maior desafio para aplicação do processo de separação por membranas é seu alto nível de incrustação da membrana, que resulta em uma diminuição de líquido separado e aumento da demanda energética do processo. Com esse alto nível de incrustação são necessárias limpezas e substituições periódicas (Jeon et al., 2016). O tamanho dos poros e a pressão sobre a membrana são fatores que afetam a eficácia do processo (Sfetsas et al., 2022).

As membranas podem ser categorizadas pelo princípio de operação em membranas porosas e membranas de difusão. Nas membranas porosas o tamanho do poro controla o processo, nas membranas de difusão a difusividade no material da membrana é o parâmetro de controle. Outra forma de classificação das membranas é por seu material, elas podem ser poliméricas ou cerâmicas. As membranas cerâmicas são a opção mais popular para microfiltração/ultrafiltração devido à sua robustez e resistência à limpeza química agressiva (Sfetsas et al., 2022).

Para o tratamento do digerido anaeróbico, quase todos os tipos de processos de membrana foram estudados: microfiltração e ultrafiltração para remover sólidos em suspensão, microorganismos e macromoléculas, nanofiltração, osmose reversa, osmose direta e eletrodialise para pequenas moléculas orgânicas e íons, como amônia (Monfet et al., 2017).

A microfiltração retém partículas entre 0,1 e 5 mm, enquanto a ultrafiltração remove macromoléculas e partículas na faixa de tamanho de 0,001–0,05 mm. Ambos os processos requerem baixas pressões de operação (Masse et al., 2007)

As membranas de nanofiltração retêm a maioria das moléculas orgânicas com peso molecular superior a 200-400 Da. O processo demanda pressões mais baixas, entre 0,35-1,7 MPa) e produzem fluxos mais altos de as membranas de osmose reversa (Masse et al., 2007).

2.6.3.2. CULTIVO DE MICROALGAS

O cultivo de microalgas tem sido considerado uma tecnologia promissora para o tratamento do digestato da digestão anaeróbia por ser uma estratégia sustentável. A grande vantagem desta tecnologia vem da capacidade das microalgas de removerem os nutrientes do digestato de forma eficiente, consumindo também CO₂ e gerando uma biomassa valiosa (Franco et al., 2018).

O digestato da DA, por sua diversidade de nutrientes fornece nitrogênio, fósforo e dióxido de carbono suficientes para o cultivo de microalgas. Foi relatado por Xia e Murphy (2016) que um metro cúbico de digerido pode fornecer nutrição suficiente para produzir 14,6 kg de biomassa de microalgas enquanto incorpora 22 kg de dióxido de carbono pela fotossíntese.

Dependendo da fonte de energia, existem três categorias principais de microalgas: fotoautotróficas, que usam carbono leve e inorgânico (CO₂, bicarbonato, etc), heterotróficas, que usam compostos orgânicos como açúcares e ácidos graxos voláteis como fonte de energia e mixotróficas que usam carbono orgânico e inorgânico (Eze et al., 2018 ; Wang et al., 2014).

A biomassa produzida no cultivo de microalgas pode ter diversas aplicações, entre elas temos a produção de bioquímicos, biocombustíveis, pigmentos, proteínas, ração animal, fertilizantes de liberação lenta, matéria-prima para digestores anaeróbios, substâncias poliméricas extracelulares, compostos cosméticos, compostos farmacêuticos e outros compostos orgânicos (Sfetsas et al., 2022; O'Connor et al., 2022).

A espécie de alga não é o único fator que influencia no processo de tratamento do digestato por microalgas, características digestivas como turbidez, teor de amônia, teor de fósforo, disponibilidade de carbono e contaminação bacteriana são fatores importantes que se

não controlados podem causar a inibição do processo ou a baixa eficiência do mesmo (Sfetsas et al., 2022).

A quantidade de sólidos em suspensão do digestato é o parâmetro controle da turbidez do processo, se existe um grande volume de sólidos a passagem da luz para o crescimento das microalgas fica limitada, diminuindo a eficiência do mesmo (Sfetsas et al., 2022). Para contornar este desafio o digestato deve ser tratado previamente pelo processo de separação sólido-líquido adequado, para que somente a fração líquida seja utilizada para o cultivo, o principal tratamento utilizado atualmente para este fim é a separação por membranas.

O principal desafio para o cultivo de microalgas a partir do digestato da DA de FORSU, é a grande quantidade de amônia. Embora as microalgas possam reduzir o nitrogênio amoniacal, se o teor de nitrogênio amoniacal total for muito alto, pode ocorrer inibição do crescimento.

Para diminuir o teor de nitrogênio amoniacal total do processo, é possível que a fração líquida do digestato seja diluída em água doce de forma que a concentração de nitrogênio diminui, porém essa alternativa aumenta a quantidade de água necessária para o processo, diminuindo a pegada ambiental do mesmo. Outra alternativa que tem sido aplicada mas que requer mais estudos, é a realização do processo em batelada, de forma a controlar a quantidade de digestato no processo e assim a concentração total de nitrogênio amoniacal (Nwoba et al., 2019).

2.6.3.3. STRIPPING DE AMÔNIA

A fração líquida do digestato contém nitrogênio, amônio dissolvido (NH_4^+) e alto teor de amônia livre (NH_3). A amônia livre pode ser tóxica para a comunidade microbiana do solo e vegetais, prejudicando a eficiência da fração líquida do digestato como fertilizante, por conta disso amônia deve ser reduzida ou removida da fração líquida antes da exploração posterior (Sfetsas et al., 2022).

Os processos biológicos de remoção de amônia do digestato não recuperam o nitrogênio de uma forma utilizável, já o método de stripping de amônia tem se provado promissor porque além de remover altas quantidades de amônia da fração líquida do digestato, oferecem o benefício adicional de recuperação do nitrogênio como um produto rentável (Sheets et al., 2015).

A amônia removida da fração líquida do digestato durante o processo de stripping é absorvida por ácido sulfúrico diluído (H_2SO_4), e convertida em sulfato de amônio ($(NH_4)_2SO_4$) que pode ser processado e vendido como fertilizante nitrogenado (Sheets et al., 2015). A remoção da amônia acontece através do princípio da transferência de massa. De acordo com este método, a fração líquida rica em amônia entra em condução com uma corrente de ar que remove a amônia livre (Sfetsas et al., 2022).

O processo de stripping é afetado pela relação ar/líquido, vazão do gás de remoção, pressão, pH e temperatura, sendo que tem sua melhor eficiência em pH alto (10-11) e alta temperatura ($70^\circ C$). A fração líquida do digestato de FORSU contém altos níveis de amônia livre e pH relativamente alto (7-8), tornando-o ideal para o processo de stripping de amônia (Sheets et al., 2015; Sfetsas et al., 2022).

O processo de stripping de amônia ainda pode ser otimizado com a combinação de outros processos, como o stripping de troca iônica, que combina air stripping e troca iônica, sendo um método viável se a concentração de amônia exceder 900 mg L^{-1} . As vantagens dessa combinação são a demanda reduzida de energia e consequente redução de custo. Outra adaptação do processo de stripping é a utilização de Rotating Packed Bed Reactors (RPB) que aumentam a transferência de massa gás-líquido através de intensa aceleração centrífuga imposta a fração líquida do digestato. Durante este processo, o reator permanece submerso na fase líquida. A rotação intensa do reator leva a uma mistura intensa devido à alta força centrífuga (Sfetsas et al., 2022).

A grande desvantagem do processo de stripping de amônia é sua alta demanda energética e consequente alto custo, que é maior porque as bombas e compressores que necessitam de energia são utilizados para introduzir ar na fase líquida (Sfetsas et al., 2022). Além dessa desvantagem temos a diminuição da eficiência em baixas temperaturas, altos custos de aquecimento, requisitos para controle de pH e compressão de ar/vapor e risco de formação de espuma (Sheets et al., 2015).

2.6.4. FRAÇÃO SÓLIDA DO DIGESTATO

A fração sólida do digestato contém entre 20 e 30% de matéria seca (Rehl e Müller, 2011). Os nutrientes presentes nas frações sólida e líquida separadas são diferentes. O

nitrogênio mineral está presente principalmente na fase líquida, enquanto na fase sólida temos maior teor de nitrogênio orgânico, fósforo e carbono (Lu et al., 2021).

Tambone et al. (2017) investigaram o processo de separação sólido-líquido de 13 plantas de DA e descobriram que a média de ST, NT e TS, TN e pentóxido de fósforo (P_2O_5) na fração sólida separada foi responsável por 33%, 13% e 29% da MS total do digestato respectivamente (Lu et al., 2021).

A desidratação do digestato, que pode acontecer pelos processos de secagem, compactação, pelletização, entre outros, é um processo essencial para o manejo e transporte do mesmo, aumentando seu ganho líquido de energia e viabilidade econômica de utilização (Lu et al., 2021). Além do excesso de umidade presente na fração sólida do digestato, um dos maiores desafios na sua aplicação direta como fertilizante é a volatilização da amônia presente na sua composição, que pode ser prejudicial para o ambiente e causar emissão de maus odores, por conta disso um dos principais pós tratamentos da fração sólida do digestato é o controle e remoção de amônia.

Entre os tratamentos utilizados atualmente da fração sólida do digestato de FORSU temos a compostagem, striping de amônia e secagem, para utilização do produto resultante como fertilizante, sendo a compostagem o mais utilizado atualmente, e pirólise para utilização do produto na produção de biocarvão e bio-óleo (Sfetsas et al., 2022). Sheets et al. (2015) relataram também o uso de fibras da fração sólida para produzir aglomerado, material de cama, cimento e agregado.

2.6.5. TRATAMENTO DA FRAÇÃO SÓLIDA

2.6.5.1. COMPOSTAGEM

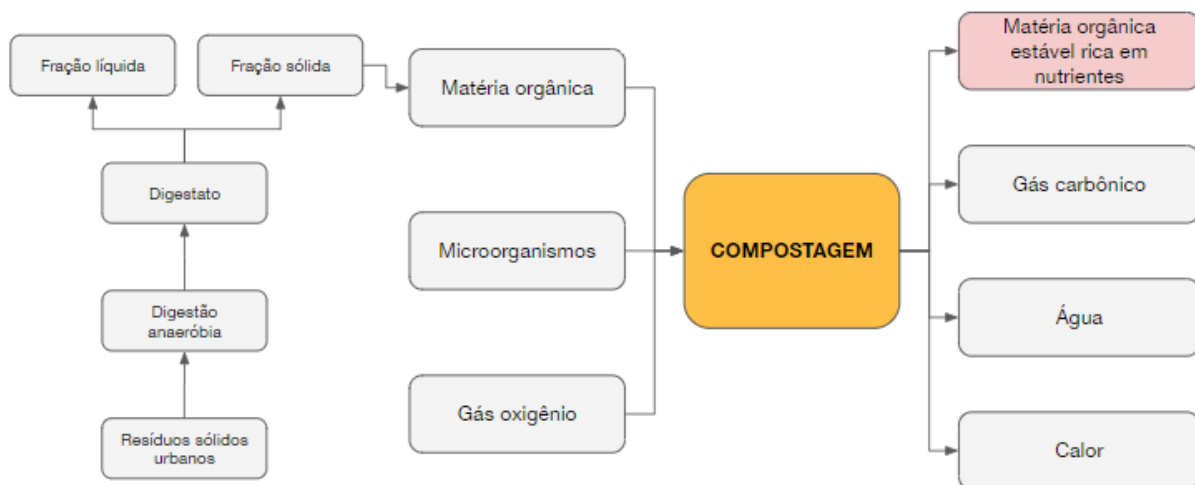
A compostagem é o pós-tratamento mais aplicado atualmente à fração sólida do digestato para estabilização e recuperação de nutrientes, transformando este substrato em um insumo de alta qualidade, sanitariamente seguro e também de boa aceitação do mercado (Fernandes et al., 1999).

O processo consiste em um conjunto de técnicas usadas para estimular a decomposição de materiais orgânicos (a partir de fungos, bactérias, insetos, etc) com o intuito de obter um material estável e rico em substâncias húmicas e nutrientes minerais que pode ser aplicado como biofertilizante. Além de, se comparado ao aterro e com a incineração, a compostagem

de FORSU é considerada um método sustentável para o circuito fechado e com baixo impacto ambiental (Manu et al., 2021).

A técnica de compostagem combina matéria orgânica, microrganismos e oxigênio em um processo de digestão aeróbia. A partir do processo de digestão aeróbia de toda essa biomassa inicial, é possível obter um composto de matéria orgânica humificada, com elementos minerais, água e biomassa microbiana estável (Vallini, 1995). A Figura 2.8 mostra o esquema simplificado da compostagem.

Figura 2.8. Fluxograma simplificado do processo de compostagem



Fonte: Adaptado de Fernandes e da Silva, 1996

A técnica da compostagem é constituída de duas fases: a de degradação rápida (ou bioestabilização) e a fase de maturação (ou humificação) (Figura 2.9).

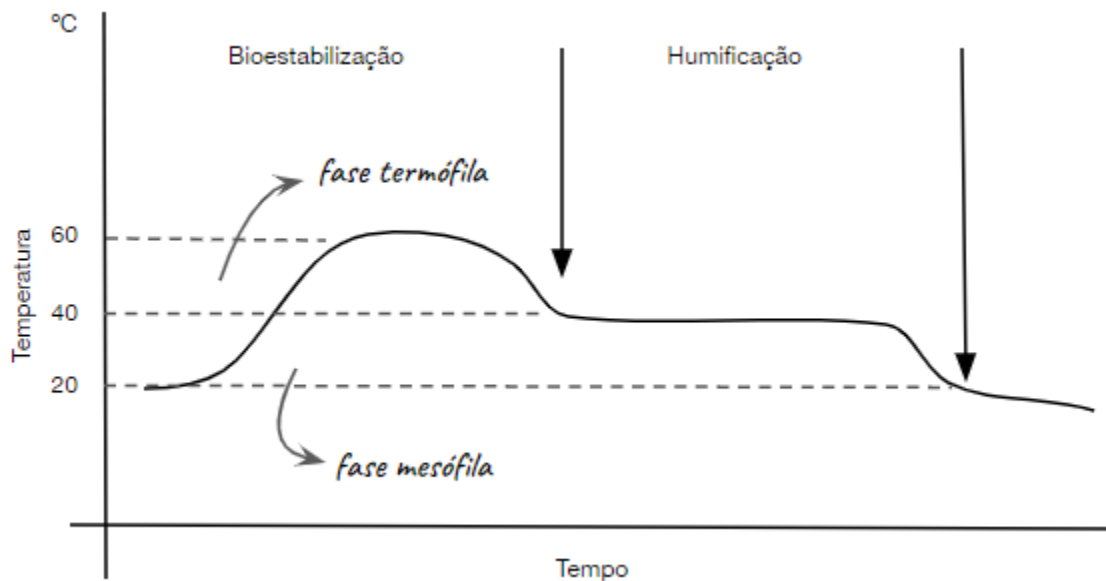
A primeira fase é caracterizada pelo crescimento da população de organismos mesófilos e é onde o processo de biodegradação se inicia. Após um tempo, quando a temperatura da composteira começa a se elevar e a taxa de decomposição começa a acelerar, os microrganismos mesófilos se reduzem e os termófilos se proliferam, sendo possível atingir temperaturas de até 60°C. Nesta temperatura é possível observar uma degradação intensa e rápida da matéria orgânica, bem como a eliminação de patógenos que possam existir na mesma.

Após a transformação de grande parte do substrato orgânico, a temperatura começa a reduzir e os microrganismos termófilos se restringem, os mesófilos se reinstalam e a atividade biológica também diminui, com isso, se inicia a segunda fase, a fase de maturação (ou fase de humificação).

Na fase de maturação a maioria das partículas biodegradáveis já foram transformadas, portanto o odor já é mais agradável, a temperatura mais estável e o final da compostagem é demarcado por um material humificado com temperatura em torno de 20°C (Fernandes e da Silva, 1996).

A maturidade completa do composto ocorre quando a matéria orgânica é transformada em húmus, o qual é comumente utilizado para fertilização e em sua composição não deve possuir nenhum tipo de contaminação (Oliveira et al., 2008).

Figura 2.9. Fases da compostagem



Fonte: Adaptado de D'Almeida; Vilhena., 2000

A qualidade da compostagem depende dos parâmetros de operação do processo, dos microrganismos e do substrato utilizado.

2.6.5.1.1. ORGANISMOS DA COMPOSTAGEM

A transformação da matéria orgânica inicial para a humificada é uma junção de organismos da mesofauna do solo (micro e macro organismos que realizam a decomposição da matéria orgânica, tais como minhocas, besouros, formigas, etc) (EMBRAPA, 2019), com microrganismos, tais como as bactérias, fungos e leveduras. No decorrer do processo da compostagem, os microrganismos liberam energia, realizando um aumento considerável da temperatura (Oliveira et al., 2008).

2.6.5.1.2. AERAÇÃO

Sendo a compostagem um processo aeróbio, sabe-se que é essencial a presença de oxigênio, visto que o mesmo é indispensável para produção de energia necessária para realizar a decomposição da biomassa (Oliveira et al., 2008). Caso ocorra a ausência de oxigênio, ocorrerá um atraso na decomposição da matéria orgânica e também a produção de gases causadores de mau odor (gás sulfídrico e outros compostos do enxofre).

A falta de oxigênio pode ocorrer devido ao excesso de umidade do substrato, compactação e tamanho da composteira, e elevada DBO.

A solução para mitigar a falta de oxigênio no processo é a redução do tamanho da composteira e a aeração da mistura, que pode ser realizada revolvendo a pilha de matéria orgânica. Esse processo pode ser feito de forma manual, com uso de enxadas, ou mecânica, utilizando máquinas tais como um Revolvedor de Leira ALLU, pá carregadeira, caçamba processadora ALLU ou um compostador da civemasa (ESALQ – USP).

A fase inicial da compostagem, na qual a atividade microbiana é intensa e a temperatura é elevada, é a que demanda maior consumo de oxigênio, e onde a aeração deve ser mais controlada (Fernandes e da Silva, 1996).

2.6.5.1.3. UMIDADE

A umidade é um parâmetro essencial na decomposição da matéria orgânica pois ela garante a atividade microbiológica. A umidade do processo é obtida a partir do ecossistema no qual ele está, ou seja, da biomassa da compostagem (Oliveira et al., 2008).

A faixa de umidade ótima para o processo é de 40 a 60%, e deve ser controlada principalmente na fase inicial da compostagem, pois é nesta etapa que se faz necessária a

adaptação do volume de água de forma a aumentar o crescimento dos microrganismos para garantir a decomposição intensa da matéria orgânica (Merckel, 1981).

Quando há umidade excessiva na composteira, ocorre a aglutinação das partículas de água, resultando em uma leira sem resistência e muito compactada, reduzindo a circulação do oxigênio do meio (Poincelot, 1975) e submetendo o sistema a uma condição anaeróbia, resultando em problemas tais como odores desagradáveis (devido às substâncias sulfídricas sendo liberadas), formação de chorume, e decomposição ineficiente do substrato (Poincelot, 1975)

O excesso de umidade também causa a redução da temperatura na composteira, retirando a leira da sua faixa ideal para a etapa de bioestabilização, reduzindo a velocidade de degradação da matéria orgânica (Poincelot, 1975)

Em contrapartida, uma composteira com uma baixa umidade (abaixo de 40%) tem como consequência a inibição da atividade dos seres vivos responsáveis pela degradação da biomassa.

2.6.5.1.4. RELAÇÃO C/N

Sabe-se que a relação C/N é importante para a composteira pois o carbono é utilizado pelos microrganismos como fonte de energia e o nitrogênio é usado para a síntese das proteínas, por esse motivo, essa relação é considerada uma forma de melhor caracterizar o equilíbrio da biomassa.

Uma relação C/N apropriada resulta no crescimento ideal das colônias de microrganismos, assim como um rendimento de atividade ótimo, possibilitando um processo de decomposição eficiente (Oliveira et al., 2008).

O acompanhamento da relação C/N permite conhecer o decorrer do processo da compostagem, visto que, quando o processo atinge o fim da bioestabilização, a relação C/N é em torno de 18/1, já quando a compostagem está no final da etapa de humificação, a relação C/N está em torno de 10/1. No início do processo, os microrganismos absorvem uma proporção de C/N de 30/1, no qual é a proporção ótima para o processo, porém a variação limite pode ocorrer entre a faixa de 26/1 e 35/1 (Oliveira et al., 2008).

Quando existe uma relação C/N muito baixa, é possível observar uma perda considerável de nitrogênio, devido a volatilização da amônia, resultando na redução da

qualidade da compostagem. Quando a relação C/N é alta, os microrganismos degradam a matéria orgânica de forma lenta, visto que não terão nitrogênio o suficiente para realizar a síntese de proteínas (Fernandes e da Silva, 1996).

2.6.5.1.5. TEMPERATURA

A temperatura da composteira é um fator indicativo muito importante a ser acompanhado, pois por ela é possível determinar a eficiência do processo. Por exemplo, se houver um registro de temperatura de 40°C a 60°C é possível concluir que a compostagem tem grandes chances de ser bem-sucedida, pois indica o auge da primeira etapa do processo, a etapa de bioestabilização. Caso contrário, é possível que algo não esteja dentro dos conformes e a técnica pode não ser concluída da forma desejada (Oliveira et al., 2008).

De acordo com Fernandes e da Silva, 1996, na etapa de bioestabilização é possível observar uma elevada temperatura no interior da leira, chegando até a 65 °C, a temperatura não deve ultrapassar este valor, pois eliminaria os seres vivos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica (Tabela 2.2). Este aumento da temperatura é em consequência ao calor gerado pela ação microbiológica dos organismos termófilos atuando no processo.

Tabela 2.2. Níveis de temperaturas dos organismos presentes na composteira para as bactérias mesófilas e termófilas

	Temperatura mínima	Temperatura ótima	Temperatura máxima
Bactérias mesófilas	15 a 25°C	25 a 40°C	43°C
Bactérias termófilas	25 a 45°C	50 a 55°C	85°C

Fonte: Adaptado Fernandes e da Silva, 1996

De acordo com Bernal et. al., (1998), é possível compreender a variação de temperatura por cada etapa do processo de compostagem e, a partir dela, rastrear em que fase o processo se encontra:

1. Na bioestabilização é possível observar três fases características:
 - a. Fase mesofílica: é a fase inicial do processo, no qual predomina a temperatura em torno de 40°C (de duração de 2 a 5 dias)

- b. Fase termofílica: temperaturas assumem valores acima de 40°C e é quando ocorre a maior velocidade de degradação da matéria orgânica (duração pode variar de dias a meses de acordo com o volume e material orgânico da composteira)
 - c. Fase de resfriamento: demarcado pela queda da temperatura para um valor de temperatura ambiente, é um momento de transição onde se dá início a segunda fase do processo: a humificação
2. Na fase de humificação é possível observar uma fase característica:
- a. Fase de maturação: é o período de estabilização do produto humificado, podendo chegar a temperaturas abaixo de 20°C.

2.7. BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE FORSU

Biofertilizantes são fertilizantes que contêm uma combinação de microorganismos vivos e recursos orgânicos. Os recursos orgânicos funcionam como suporte para crescimento dos microorganismos e suplementação para nutrição de plantações (Singh et al., 2019; Areeshi M. Y., 2022). Os biofertilizantes melhoram a qualidade do solo, melhorando sua fertilidade, biodiversidade e disponibilidade de nutrientes (Md. Tahir et al., 2019; Areeshi M. Y., 2022).

Os microorganismos presentes no biofertilizante são diversos, entre eles temos bactérias solubilizadoras de fosfato (*Pseudomonas* sp.), bactérias responsáveis pela fixação de nitrogênio (*Azotobacter*, *Rhizobium*), fungos e cianobactérias fixadoras de nitrogênio (*Anabaena*). A combinação adequada desses microorganismos com os nutrientes orgânicos aumenta o suprimento de nutrição para a vegetação (Areeshi M. Y., 2022).

O digestato proveniente da DA é classificado como um biofertilizante, por sua variedade de microorganismos e componentes orgânicos, e atualmente esta é sua principal aplicação (Sfetsas et al., 2022).

Mesmo entre os biofertilizantes provenientes da DA temos uma grande variação, suas diferenças se devem ao substrato utilizado para DA, fonte de microorganismos, configuração do digestor e pós-tratamentos aplicados ao digestato (Owamah et al., 2014).

Por seu potencial nutritivo e consequente aumento do rendimento agrícola, a utilização de biofertilizantes é uma grande promessa para melhorar a segurança alimentar global, principalmente em países em desenvolvimento da África e Ásia que sofrem com dificuldade

de subsistência. Os biofertilizantes, portanto, têm o potencial de fornecer benefícios socioeconômicos e ecológicos, entre os quais estão melhorias na qualidade do solo, qualidade e segurança alimentar, saúde humana e animal, bem como na qualidade ambiental (Owamah et al., 2014).

Atualmente ainda temos a predominância de fertilizantes minerais e sintéticos no mercado, porém os fertilizantes orgânicos possuem diversas vantagens sobre estes. Além da vantagem econômica, por serem em geral produtos de baixo custo, também auxiliam a diminuir o impacto ambiental, contribuindo com uma produção circular que utiliza todos os recursos a partir de fontes renováveis, e devido a sua combinação de microorganismos e resíduos orgânicos neutralizam os impactos nocivos causados por fertilizantes químicos.

A utilização em larga escala de fertilizantes químicos resultou na piora da qualidade do solo, degradação ambiental, eutrofização e poluição por metais pesados (Owamah et al., 2014). Os biofertilizantes antes de serem aplicados no solo passam por um rigoroso controle de patógenos, metais pesados e concentração de nutrientes para que não tenham o impacto similar ao de fertilizantes químicos. Além disso, otimizar a dosagem e o método de aplicação são importantes para alcançar o máximo rendimento, dependendo do solo e do tipo de cultura (Sfetsas et al., 2022).

Uma das desvantagens da utilização do digestato da DA como biofertilizante pode ser seu teor de amônia. Dependendo de diversos fatores, como substrato e parâmetros de digestão, o digestato pode ter uma alta concentração de amônia, quando este digestato é aplicado no solo sem o tratamento adequado temos a volatilização da amônia, causando a poluição do ar e dispersão de maus odores, além de diminuir a disponibilidade potencial de nutrientes para as plantas.

A utilização de biofertilizantes no geral, incluindo os oriundos da DA, principalmente por sua diversidade de compostos e substratos fonte, depende do cumprimento de padrões de qualidade e legislação de cada país, a segurança de utilização é uma grande preocupação de saúde pública (Owamah et al., 2014). A aplicação do digestato como fertilizante é regida por parâmetros rígidos em relação ao teor de nutrientes (N, P₂O₅, K₂O) e possíveis contaminantes.

A utilização de fertilizantes provenientes do digestato da DA ainda é uma novidade no Brasil, e não temos uma legislação específica para eles, tendo que ser adaptada a norma geral de aplicação de biofertilizantes. Existe a necessidade de pesquisa e desenvolvimento de

oportunidades para apoiar a comercialização de produtos digeridos como fertilizantes de alta qualidade e ambientalmente seguros, atualmente existe muito preconceito com esse tipo de fertilizante o que ajuda na manutenção da hegemonia dos fertilizantes sintéticos.

Um número maior de pesquisas permitirá que as entidades governamentais incorporem regulamentos de uso de digestatos e biofertilizantes com base em evidências científicas (Lamolinara et al., 2022).

Tabela 2.3. Critérios de caracterização do digestato para uso como fertilizante

Padrões do digestato			
Parâmetros	Unidade	Padrões ideais	Referências
Umidade	%	92,2 - 98,1	(Lu et al., 2021)
SV/ST	-	61,7 -73,6	(Lu et al., 2021)
Relação C/N	-	2,63	(Lu et al., 2021)
E. coli (fecais)	NMP/g de ST	<10 ³	(CONAMA, 2006)
Aplicação via foliar			
Parâmetros	Unidade	Padrões ideais	Referências
Nitrogênio (N)	% mínima	1,00	(MAPA, 2020)
Fósforo (P ₂ O ₅)	% mínima	1,00	(MAPA, 2020)
Potássio (K ₂ O)	% mínima	1,00	(MAPA, 2020)
C org (teor total)	% mínima	6,00	(MAPA, 2020)
Zinco (Zn)	% mínima	0,10	(MAPA, 2020)
Ferro (Fe)	% mínima	0,02	(MAPA, 2020)
Magnésio (Mg)	% mínima	0,50	(MAPA, 2020)
Manganês (Mn)	% mínima	0,02	(MAPA, 2020)
Cálcio (Ca)	% mínima	0,50	(MAPA, 2020)
Enxofre (S)	% mínima	0,50	(MAPA, 2020)
Boro (B)	% mínima	0,01	(MAPA, 2020)
Aplicação via solo			
Parâmetros	Unidade	Padrões ideais	Referências
Zinco (Zn)	mg/kg base seca máx.	41	(CONAMA, 2006)

Selênio (Se)	mg/kg base seca máx.	1300	(CONAMA, 2006)
Arsênio (As)	mg/kg base seca máx.	39	(CONAMA, 2006)
Bário (Ba)	mg/kg base seca máx.	300	(CONAMA, 2006)
Cádmio (Cd)	mg/kg base seca máx.	1500	(CONAMA, 2006)
Chumbo (Pb)	mg/kg base seca máx.	1000	(CONAMA, 2006)
Cobre (Cu)	mg/kg base seca máx.	17	(CONAMA, 2006)
Cromo (Cr)	mg/kg base seca máx.	50	(CONAMA, 2006)
Mercúrio (Hg)	mg/kg base seca máx.	420	(CONAMA, 2006)
Molibdênio (Mo)	mg/kg base seca máx.	100	(CONAMA, 2006)
Níquel (Ni)	mg/kg base seca máx.	2800	(CONAMA, 2006)

2.8. DESAFIOS E PERSPECTIVAS

A valorização do digestato de FORSU está se tornando uma prática cada vez mais popular ao redor do mundo, porém por ser uma tecnologia nova, ainda enfrenta muitos desafios pela falta de conhecimento e pesquisas suficientes sobre seu uso adequado, o que aumenta o preconceito sobre esse produto. Entre as preocupações mais relatadas com o uso do digestato de FORSU estão emissões de odores, contaminantes, lixiviação de nutrientes para o meio ambiente, e a falta de regulamentação e políticas específicas para produtos do digestato de FORSU (O'Connor et al., 2022).

Devido à natureza fitotóxica dos digestatos de FORSU, tecnologias futuras e técnicas de otimização para reduzir compostos inibitórios, como a amônia, devem ser cada vez mais pesquisados. Além disso, usos alternativos e tecnologias emergentes para digestatos de FORSU devem ser avaliados de forma a gerar cada vez mais produtos de valor econômico agregado (O'Connor et al., 2022).

No geral, o mercado do digestato é pouco desenvolvido e o conhecimento das aplicações do digestato é baixo. Mesmo assim, a importância da padronização do produto digestato está crescendo com a produção de biogás a partir de FORSU, de forma que o digestato deixe de ser um gargalo na produção energética e passe a integrar uma produção circular de redução de rejeitos.

Um número pequeno de empresas está produzindo produtos do digestato de FORSU certificados como mercadoria, e menos ainda obtiveram grande sucesso em sua comercialização devido ao baixo preço de fertilizantes inorgânicos, desconhecimento do produto e variação de qualidades. Fertilizantes de alta qualidade a partir de digestato de FORSU têm sido vendidos na faixa dos 20 - 57 US\$/ton no mercado enquanto o preço de fertilizantes inorgânicos está na média dos 8,5 US\$/ton, o que torna o fertilizante do digestato de FORSU pouco competitivo. Embora o preço e o custo possam variar entre diferentes processos e áreas, o produto fertilizante é um promissor ponto de crescimento de lucro para as usinas de biogás (Lu et al., 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. LEVANTAMENTO DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

A análise bibliométrica é uma ferramenta de pesquisa que utiliza análise quantitativa e estatística para descrever a tendência de pesquisa de um campo específico e tem sido amplamente aplicada em estudos para comparar a produção científica e as tendências de pesquisa em muitos campos (Ren et al., 2018).

O trabalho realizado constituiu em uma análise sistemática da literatura para identificação e levantamento de publicações que tenham realizado ou analisado métodos de pré-tratamentos e aproveitamento do digestato proveniente da digestão anaeróbia como um produto rentável e utilizável.

Utilizando a base de dados do Web of Science, buscou-se por palavras-chave amplas relacionadas aos principais temas do estudo, como “*anaerobic digestion*”, “*food waste digestate*”, “*biofertilizer*”, “*anaerobic digestate*”, “*urban solid waste digestate*”, “*fertilizer anaerobic*” “*digestate*”, “*post treatment anaerobic digestate*”, “*post-treatment of digestate*”. A partir dessa primeira busca foram selecionadas as palavras-chave mais relevantes, e a combinação delas que apresentou maior número de artigos relevantes ao tema. Para escolha das palavras-chave mais relevantes, foi analisado em quantas publicações apareciam tais palavras-chave, de forma que as mais citadas foram consideradas mais relevantes.

A combinação escolhida para adquirir todo o índice de artigos publicados nos últimos 20 anos (2002-2022) foi “*food waste digestate OR fertilizer anaerobic digestate OR post treatment anaerobic digestate*”, e através desta primeira pesquisa, realizada no dia 19 de julho de 2022, foram encontrados 1632 artigos sobre o tema abordado.

Utilizando a ferramenta “analisar os resultados” da base de dados Web of Science foi realizada a análise quantitativa dos artigos obtidos na pesquisa descrita. Nesta análise dos resultados os artigos foram classificados por “autor”, “país”, “tipo de documento”, “ano de publicação”, “área de pesquisa”.

3.2. ANÁLISE DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS MAIS RELEVANTES

Com objetivo de aprofundar o estudo, a partir da pesquisa de levantamento de publicações na base de dados do Web of Science, foram selecionados 43 artigos mais relevantes (Tabela 4.1) para serem analisados, que foram ordenados pelo número de citações fornecido pela plataforma.

A seleção foi feita utilizando a classificação por relevância da própria base de dados Web of Science, que utiliza como critérios para classificação quantos termos de pesquisa são encontrados em cada registro, considerando título da publicação, palavras-chave, resumo e *Keywords Plus*, sendo que os dois primeiros critérios possuem peso maior de relevância, e a classificação manual, onde foram excluídos trabalhos que não tratem de resíduos sólidos urbanos como substrato da digestão anaeróbia, que não tenham como foco a utilização final do digestato como produto de interesse e que não identifiquem de forma correta/detalhada qual foi o pós-tratamento utilizado no digestato.

3.3. PÓS-TRATAMENTOS COM MAIOR POTENCIAL DE APLICAÇÃO PARA PRODUÇÃO DO DIGESTATO COMO PRODUTO DE VALOR

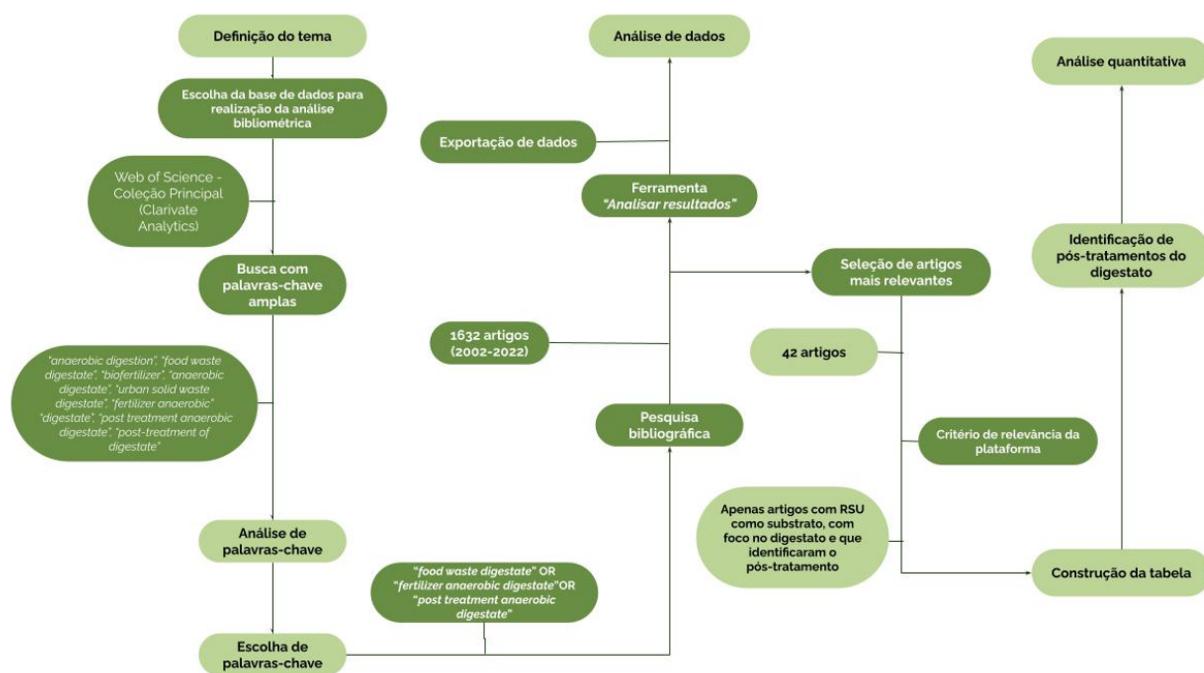
A partir da curadoria e análise dos artigos mais relevantes (Tabela 4.1), foram identificados e classificados os pós-tratamentos do digestato proveniente da DA mais consolidados e com maior taxa de sucesso globalmente. Para isso foram identificados e relatados manualmente em uma tabela os tratamentos utilizados em cada publicação relevante, e posteriormente foi feita a análise quantitativa de cada tratamento utilizado.

Os pós tratamentos foram avaliados e classificados em tratamentos para o digestato cru, onde entram principalmente as operações de separação sólido-líquido, e tratamentos específicos para as frações sólida e líquida do digestato após a separação sólido-líquido.

Os dados finais e análise dos pós-tratamentos, motivaram uma reflexão crítica sobre processos que podem ser aplicados no Brasil de forma a promover maior utilização do digestato da DA, e considerações para trabalhos futuros.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma de todo o processo da metodologia empregada para a construção do trabalho.

Figura 3.1. Fluxograma das etapas que compõem a análise bibliométrica realizada



Fonte: Acervo pessoal

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PESQUISA DE PUBLICAÇÕES

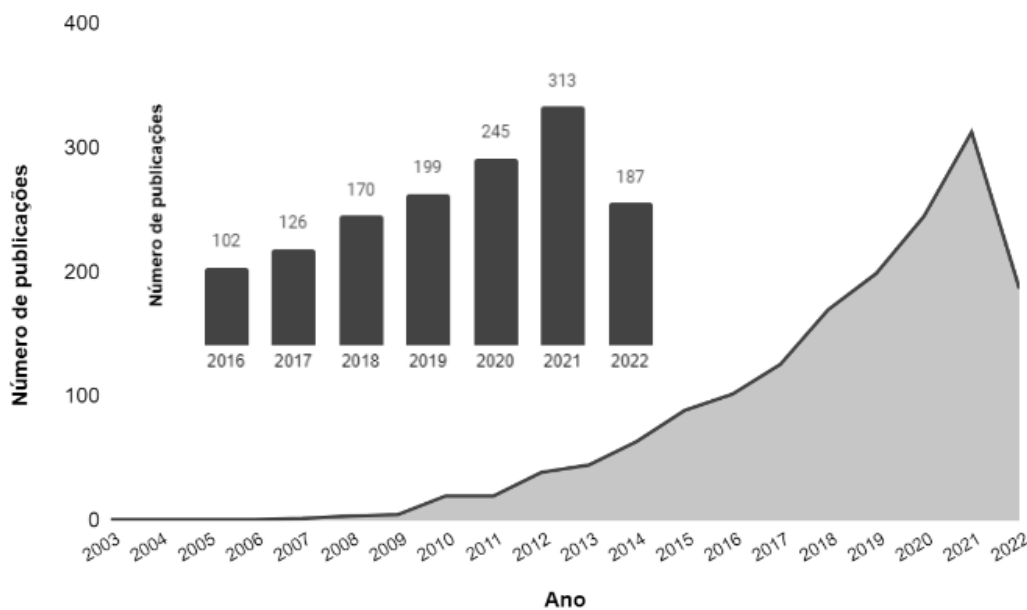
Na primeira etapa do trabalho foi realizada uma pesquisa com a combinação de palavras-chave escolhida como mais relevante na plataforma Web of Science. A pesquisa resultou em 1632 publicações, as quais foram classificadas por ano da publicação, país, autores, tipo de publicação e área de pesquisa.

4.1.1. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS ESTUDOS AO LONGO DOS ANOS

A digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos já é considerada um processo promissor no que se refere a produção de energia e aproveitamento de resíduos emissores de GEE que seriam descartados. Além disso, neste trabalho fica claro o potencial de aproveitamento do subproduto da digestão como um material valioso ambientalmente e economicamente.

Neste sentido os processos de tratamento e a diversificação de aplicações para o digestato vem sendo cada vez mais estudados nos últimos anos (Figura 4.1).

Figura 4.1. Publicações sobre tratamento do digestato da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos desde 2002 na base de dados Web of Science



Fonte: Acervo pessoal

Foram analisadas 1632 publicações desde 2002 até 2022. Até o ano 2009 as pesquisas eram poucas, sendo alguns anos com nenhum estudo focado no tema, totalizando apenas 13 publicações no período. A pouca quantidade de publicações é explicada pelo contexto da época em que o debate sobre o aquecimento global ainda não estava aquecido e o fenômeno ainda era muito desacreditado.

Entre o período que vai de 2010 a 2015 as pesquisas começam a crescer junto com o debate sobre o aquecimento global após a Conferência de Copenhague em 2009, porém ainda sem grande força, totalizando 277 publicações no período. Em 2015 é assinado o Acordo de Paris, no qual são definidas as primeiras metas para conter o aquecimento global em âmbito mundial, com isso o debate sobre aquecimento global e consequentemente sobre estratégias para conter a emissão de gases do efeito estufa e começa a ficar aquecido, com isso no período de 2016 a 2021 o volume de pesquisas aumenta exponencialmente, totalizando 1155 pesquisas, nesse contexto fica evidente o crescimento da busca por fontes de energia renováveis e estratégias de gestão de resíduos emissores de metano, a digestão anaeróbia aparece como uma das estratégias mais promissoras, e com ela surge a demanda por gestão do digestato, subproduto da digestão.

Até julho de 2022, quando esta análise foi realizada, o total é de 187 publicações no ano, superando o ano de 2018, e significando que ainda se tem uma tendência de alta na quantidade de estudos sobre o tema.

Podemos afirmar que as pesquisas nessa área são muito recentes, apesar de terem aumentado nos últimos anos, indo de 102 em 2016 para 313 pesquisas em 2021. Como as pesquisas sobre o tema são recentes, ainda não temos muita utilização de produtos advindos do digestato nem legislações específicas para os mesmos.

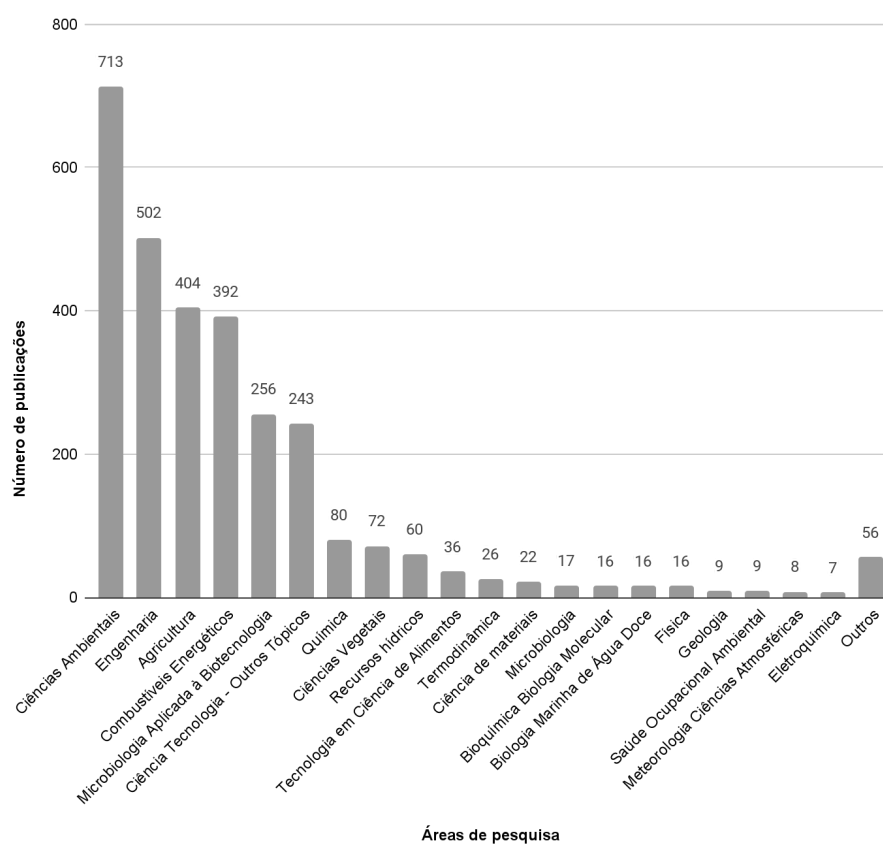
4.1.5. ÁREAS DE PESQUISA

A segunda análise realizada consistiu em agrupar as publicações de acordo com suas áreas de pesquisa (Figura 4.2). Observa-se que grande parte dos estudos são classificados como “Ciências Ambientais”, “Engenharias” e “Agricultura”, evidenciando novamente o potencial desses processos como alternativas que considerem e diminuam o impacto ambiental da produção de energia por digestão anaeróbia, e que gerem valor como na obtenção de produtos rentáveis para a agricultura.

Pensando que o Brasil tem a agricultura como uma das principais bases econômicas do país, fica evidente a necessidade de termos mais estudos sobre a utilização do digestato como produto de valor para este setor.

Outra área de pesquisa que aparece em destaque é “Combustíveis Energéticos”, evidenciando a importância e crescimento dos estudos em busca de energias alternativas.

Figura 4.2. Quantidade de publicações por área de pesquisa na base de dados Web of Science



Fonte: Acervo pessoal

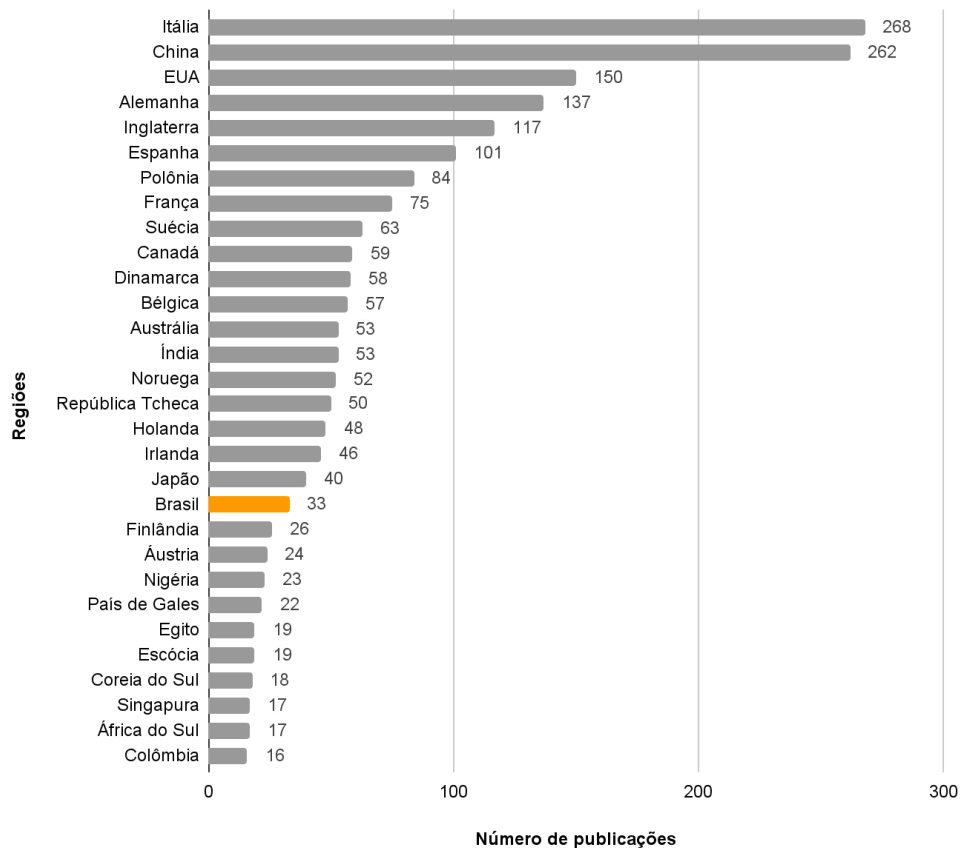
4.1.2. PAÍSES QUE MAIS PUBLICAM

A fim de identificar os países que mais avançaram sobre o tema, realizou-se também uma segregação por número de publicações em cada país. Foram identificados 93 países com

publicações sendo que os trinta países que mais publicam representam cerca de 85% de todas as publicações (Figura 4.3).

O país com maior número de publicações é a Itália, com 268 estudos publicados, seguida pela China com 262, representando 16,5% e 16% de todos os trabalhos, respectivamente. O Brasil ocupa a vigésima posição de países que mais publicaram, tendo um total de 33 trabalhos publicados, os quais 45% sendo da área de ciências ambientais com maior foco na digestão de rejeitos da pecuária suína e tratamento da FORSU, sendo que o pós tratamento do digestato mais citado entre os 33 trabalhos é o cultivo de microalgas aplicado a fração líquida do mesmo.

Figura 4.3. Trinta países com estudos mais publicados sobre tratamento do digestato na base de dados Web of Science

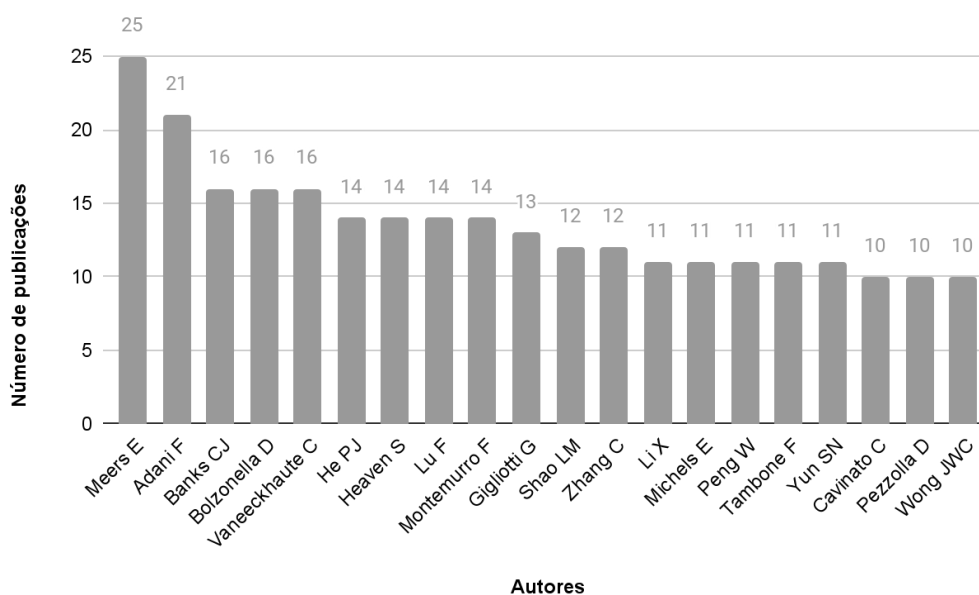


Fonte: Acervo pessoal

4.1.3. AUTORES QUE MAIS PUBLICAM

Para entender o padrão de publicações e a variedade das mesmas, foi feita a análise de autores com maior número de publicações, foram encontradas publicações de 5.524 autores, a Figura 4.4 destaca os vinte autores que mais publicaram, com destaque para Erik Meers e Fabrizio Adani.

Figura 4.4. Vinte autores com estudos mais publicados sobre tratamento do digestato na base de dados Web of Science



Fonte: Acervo pessoal

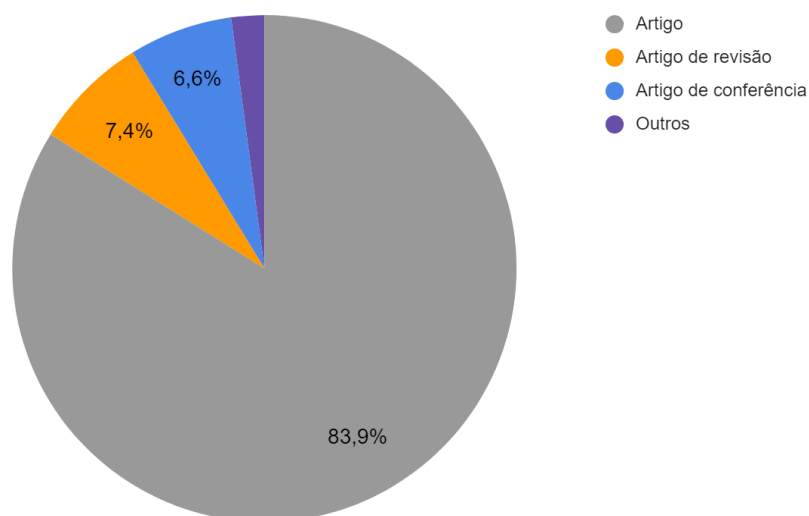
4.1.4. TIPOS DE PUBLICAÇÃO

Utilizando a segregação por tipos de publicação da plataforma Web of Science, que classifica os trabalhos em artigos de pesquisa, artigos de revisão, artigos de conferência, e outros, que incluem acesso antecipado, capítulos de livros, artigos de dados, material editorial e resumo da reunião e representam apenas 2,1% do total das publicações (Figura 4.5).

Majoritariamente as publicações são de artigos de pesquisa, com 83,9% do total, seguida por artigos de revisão com apenas 7,4%, indicando mais uma vez que as pesquisas sobre o tema ainda são muito recentes e têm grande campo para exploração.

Os artigos de conferência, que correspondem a artigos de anais de eventos, somam 6,6% do total de publicações.

Figura 4.5. Tipos de publicações sobre tratamento do digestato na base de dados Web of Science



Fonte: Acervo pessoal

4.2. PUBLICAÇÕES RELEVANTES

4.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS TRABALHOS SELECIONADOS

A partir da primeira pesquisa realizada na plataforma Web of Science, entre os anos 2002 e 2003, foram selecionados 42 artigos mais relevantes, de acordo com a classificação de relevância da própria plataforma, para análise e aprofundamento dos pós-tratamentos mais utilizados no digestato da DA, os artigos selecionados e tratamentos estão compilados na Tabela 4.1, ordenados por número de citações. Os artigos têm em comum pelo menos um dos substratos utilizados na digestão anaeróbia, sendo FORSU. De acordo com a tabela 4.1, o autor com maior número de citações foi Sheets et al. (2015), com 147 citações, em sua publicação foram avaliados os diferentes métodos de tratamento do digestato. Como já era

esperado as publicações mais recentes, de 2022, apresentaram o menor número de citações, com no máximo 8 citações.

Para maior entendimento de como a literatura aborda a temática de tratamento e uso do digestato e quais os principais processos vêm sendo estudados nos últimos anos, foram selecionadas publicações que tratam de diferentes aplicações e tratamentos. A partir desta seleção, foram feitas análises de objetivo dos trabalhos, ano de publicação, tratamentos para o digestato cru, sem separação ou antes desta, e tratamentos para as frações sólida e líquida separadamente.

Tabela 4.1. Processos descritos nos trabalhos selecionados para tratamento do digestato

Citações	Objetivo	Uso do digestato	Separação sólido-líquido / Tratamento do digestato cru	Tratamento da fração sólida	Tratamento da fração líquida	Fração do digestato utilizada no final do processo	Ano	Referência
147	Avaliar métodos de tratamento do digestato	Utilização como fertilizante e outros fins	<ul style="list-style-type: none"> - Centrifugação - Filtração (screw press) - Filtração - Evaporação - Flotação 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostagem - Pirólise - Pelotização 	<ul style="list-style-type: none"> - Célula de combustível microbiana - Stripping de amônia - Osmose reversa - Precipitação de estruvita - Hidroponia - Cultivo de microalgas 	Fração sólida e líquida	2015	Sheets et al., 2015
107	Comparar tratamentos do digestato líquido	Fertilizante	Centrifugação	-	<ul style="list-style-type: none"> - Stripping de amônia - Evaporação - Separação por membrana (osmose reversa) 	Fração líquida	2016	Tampio et al., 2016
101	Revisar tratamentos aplicados ao digestato	Fertilizante	<ul style="list-style-type: none"> - Filtração (screw press) - Decantador - Peneiração - Floculação/precipitação - Flotação - Filtração 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostagem - Secagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Separação por membrana - Evaporação - Remoção de amônia - Processos biológicos - Troca iônica - Precipitação de estruvita - Eliminação extrativa de nitrogênio em processos de contator de membrana 	Fração sólida e líquida	2013	Fuchs et al., 2013
83	Revisar técnicas de melhoria do digestato	Fertilizante	<ul style="list-style-type: none"> - Filtração (screw press) - Centrifugação 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostagem - Secagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Separação por membrana - Evaporação - Stripping - Tratamento biológico (oxidação de amônia) 	Fração sólida e líquida	2019	Logan et al., 2019

83	Revisar como um todo a DA de resíduos sólidos urbanos	Fertilizante	- Secagem - Filtração	- Compostagem - Incineração	- Stripping de amônia - Recuperação de fósforo	Fração sólida e líquida	2021	Zamri et al., 2021
76	Revisar formas de caracterização e tratamentos aplicados ao digestato	Biofertilizante, cobertura de aterro entre outros materiais	- Espessamento - Reed beds - Evaporação - Aeração	- Compostagem - Pirólise - Secagem - Incineração	- Stripping de amônia - Precipitação de estruvita - Separação por membranas - Cultivo de microalgas - Evaporação a vácuo - Oxidação biológica - Pântanos	Fração sólida e líquida	2017	Peng et al., 2017
74	Avaliar impacto da utilização de biofertilizantes de AD no meio ambiente	Fertilizante	Filtração	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2014	Owamah et al., 2014
66	Estabilização do digestato por compostagem	Fertilizante	Não identificado	Compostagem	-	Fração sólida	2016	Zeng et al., 2016
65	Utilização do digestato como fertilizante	Fertilizante	- Centrifugação	- Compostagem - Mistura com outros substratos	- Diluição	Fração sólida e líquida	2016	Scholwin et al., 2016
58	Utilização do digestato como fertilizante	Fertilizante, combustível, cultivo de larvas e fungos, cobertura de aterro	Não identificado	- Pirólise - Gaseificação	-	Fração sólida	2020	Peng et al., 2020
44	Diminuir as emissões climáticas em toda cadeia da digestão anaeróbia	Fertilizante	Centrifugação	-	-	Fração sólida e líquida	2019	Timonen et al., 2019

44	Revisar propriedades do digestato de FORSU e os principais tratamentos para a fração sólida	Fertilizante, produção de biomassa, biochar e biopesticidas	- Centrifugação - Filtração (screw press)	- Compostagem - Pirólise	-	Fração sólida	2021	Dutta et al., 2021
41	Germinação de hortaliças utilizando digestato DA como fertilizante	Fertilizante	- Aquecimento - Diluição	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2020	Cheong et al., 2020
40	Abordar desafios da compostagem de resíduos alimentares e buscar alternativas para mitigar a perda de nitrogênio no processo	Fertilizante	Não identificado	Compostagem	-	Fração sólida	2021	Manu et al., 2021
31	Retirar patógenos e amônia do digestato	Fertilizante	- Aquecimento e condensação - Stripping de amônia	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2017	Törnwalla et al., 2017
27	Analisar custos de diferentes tratamentos aplicados ao digestato	Fertilizante	- Filtração (screw press) - Secagem - Ultrassom - Flocação	- Compostagem	- Separação por membrana - Osmose reversa - Stripping de amônia - Evaporação a vácuo - Precipitação de estruvita - Cultivo de microalgas	Fração sólida e líquida	2020	Herbes et al., 2020
26	Avaliar viabilidade do uso do digerido como fertilizante depois de granulado com pó calcário	Fertilizante	Granulação	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2012	Mangwandi et al., 2012
22	Cultivo de microalgas	Fertilizante e produção de biomassa	- Sedimentação - Filtração - Diluição	-	Cultivo de microalgas	Fração líquida	2019	Nwoba et al., 2019

20	Investigar rotas para a valorização do excesso de digerido	Cultivo de microalgas	- Diluição - Sedimentação - Separação por membrana	-	Cultivo de microalgas	Fração Líquida	2020	Fernandes et al., 2020
18	Compostagem	Fertilizante	Não identificado	Compostagem	-	Fração sólida	2018	Knoop et al., 2018
18	Avaliar eficiência do uso de biofertilizante no cultivo de hortaliças	Fertilizante	Filtração com biochar	-	-	Fração sólida	2021	J. T. E. Lee et al., 2021
17	Analisar pós tratamentos utilizados no digestato sólido	Fertilizante	- Filtração (screw press) - Centrifugação	- Secagem - Compostagem - Bio Drying	-	Fração sólida	2021	Lu et al., 2021
17	Estudar o impacto do uso do digestato como fertilizante para diminuir a perda de N na cultura de trigo, e comparar o rendimento do processo da aplicação do digestato cru, digestato acidificado, digestato com inibidor de nitrificação e combinados.	Fertilizante	Combinação do digestato com inibidor de nitrificação e digestato acidificado.	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2018	Sánchez-Rodríguez et al., 2018
14	Utilização como fertilizante e análise de emissões de GEE	Fertilizante	- Centrifugação - Filtração (screw press)	- Compostagem - Secagem	- Separação por membrana (osmose reversa)	Fração sólida e líquida	2016	Askri et al., 2016
12	Cultivo de microalgas para tratamento do digestato	Fertilizante	Cultivo de microalgas	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2018	Franco et al., 2018

8	Levantamento de pós-tratamentos que melhorem a utilização do digerido	Fertilizante	- Filtração - Centrifugação - Gaseificação - Produção de biomassa	- Hidrólise - Secagem - Pirólise	- Separação por membrana - Osmose reversa - Stripping de amônia - Precipitação de estruvita - Microondas - Oxidação de amônia	Fração sólida e líquida	2022	Lamolnara et al., 2022
8	Sintetizar sulfato de amônia para ser aplicado como fertilizante	Fertilizante	Secagem com energia solar	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2019	Batista et al., 2019
7	Produção de biochar	Produção de carvão que pode ser utilizado como fertilizante	Não identificado	Pirólise	-	Fração sólida	2021	Peng et al., 2021
7	Analisar aplicação do digestato como fertilizante de diferentes maneiras (combinado com biochar, compostagem)	Fertilizante	Não identificado	Compostagem	-	Fração sólida	2021	Lee et al., 2021
5	Comparar o desempenho como fertilizante, em diferentes vegetais, do digestato diluído com o resíduo (fração sólida) do digestato filtrado com biochar	Fertilizante	Filtração	-	-	Fração sólida	2021	Song et al., 2021
3	Comparar eficiência dos pós tratamentos do digestato	Fertilizante	- Centrifugação	Secagem	- Separação por membrana (osmose reversa)	Fração sólida e líquida	2022	Angouria-Tso rochidou et al., 2022

2	Síntese de NH ₄ HCO ₃ para utilização como fertilizante	Fertilizante	Não identificado	-	- Síntese de amônia - Destilação	Fração líquida	2021	Centorcelli et al., 2021
2	Recuperação de metano residual	Produção de metano	Segunda digestão anaeróbia	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2021	Uludag-Demirer et al., 2021
2	Avaliar impacto ambiental no processo de produção de biogás e aproveitamento de digestato	Compostagem, incineração e aterro	Não identificado	Compostagem	-	Fração sólida	2022	Xiao et al., 2022
2	Compostagem	Fertilizante	Não identificado	Compostagem	-	Fração sólida	2021	Chaher et al., 2021
2	Revisar tratamentos aplicados ao digestato	Utilização como fertilizante e outros fins	- Filtração - Flotação - Centrifugação	- Compostagem - Hidrólise enzimática - Hidrólise - Secagem - Combustão - Pirólise - Gaseificação - Microondas - Ultrassom	- Separação por membrana - Stripping de amônia - Precipitação de estruvita - Cultivo de microalgas	Fração sólida e líquida	2017	Monfet et al., 2017
1	Comparar e eficiência do digestato cru e combinado com biochar como fertilizantes	Fertilizante	Combinação com biochar	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2022	Mickan et al., 2022
1	Produção de biomassa	Produção de biomassa de insetos	Produção de biomassa	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2022	Fu et al., 2022

1	Fazer revisão de tratamentos utilizados no digerido líquido da DA	Utilização como fertilizante e outros fins	<ul style="list-style-type: none"> - Filtração (screw press) - Centrifugação - Filtração - Flotação de ar - Filtração filtro prensa - Filtração a vácuo 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Stripping de amônia - Troca iônica e adsorção - Coagulação - Osmose reversa - Evaporação - Tratamento biológico aeróbio - Oxidação anaeróbia de amônio - Cultivo de microalgas 	Fração líquida	2022	Steftsas et al., 2022
0	Analisar pós tratamentos utilizados no digestato para uso como fertilizante	Fertilizante, cultivo de microalgas, hidroponia, produção de biochar	<ul style="list-style-type: none"> - Separação por membrana - Evaporação 	- Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> - Stripping de amônia - Evaporação a vácuo - Cultivo de microalgas 	Fração sólida e líquida	2022	O'Connor et al., 2022
0	Utilização do digestato como fertilizante	Fertilizante	Secagem	-	-	Fração sólida e líquida	2020	Simon F. W., 2020
0	Aproveitamento de resíduos alimentares como biofertilizantes a partir da DA	Fertilizante	Aplicação direta no solo	-	-	Digestato Cru (não houve separação)	2022	Areeshi M. Y., 2022

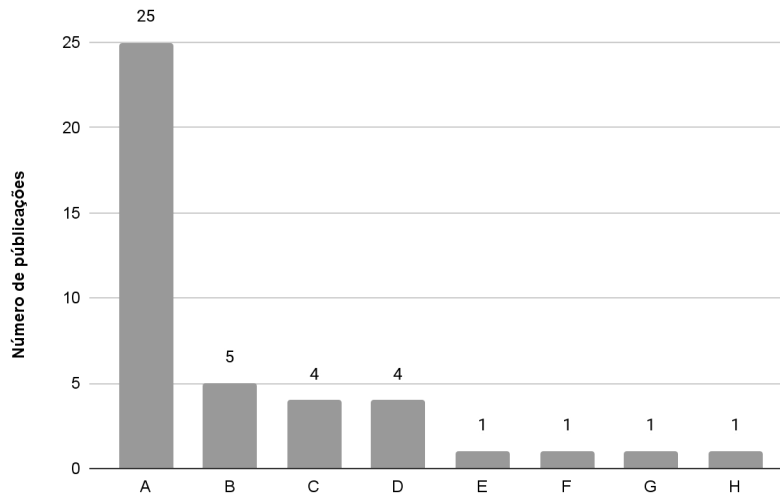
4.2.2. OBJETIVO DOS TRABALHOS RELEVANTES

Os trabalhos selecionados possuíam diferentes objetivos específicos, conforme mostra a Tabela 4.1. A fim de realizar a análise de objetivos, os específicos foram generalizados em 8 objetivos de acordo com suas semelhanças, que podem ser visualizados na Tabela 4.2, junto com seus respectivos autores. A Figura 4.5 traz o número de publicações correspondente a cada objetivo geral, que também apresenta o número de trabalhos correspondente a cada objetivo e quais os autores referentes a esses trabalhos.

Tabela 4.2. Generalização de objetivos específicos dos trabalhos selecionados

Objetivos	Descrição	Autores
A	Avaliar pós-tratamentos do digestato para uso como fertilizante e outros produtos de valor	O'Connor et al., 2022; Centorcelli et al., 2021; Lu et al., 2021; Lamolinara et al., 2022; Scholwin et al., 2016; Franco et al., 2018; Peng et al., 2020; Peng et al., 2021; Chaher et al., 2021; Knoopa et al., 2018; Nwoba et al., 2019; Steftsas et al., 2022; Sánchez-Rodríguez et al., 2018; Batista et al., 2019; Törnwalla et al., 2017; Zeng et al., 2016; Manu et al., 2021; Herbes et al., 2020; Areeshi M. Y., 2022; Monfet et al., 2017; Dutta et al., 2021; Sheets et al., 2015; Peng et al., 2017; Fuchs et al., 2013; Logan et al., 2019
B	Comparar eficiência dos pós tratamentos do digestato	Song et al., 2021; Tampio et al., 2016; Angouria-Tsorochidou et al., 2022; Mickan et al., 2022; Lee et al., 2021
C	Avaliar potencial fertilizante do digestato da DA	Cheong et al., 2020; J. T. E. Lee et al., 2021; Mangwandi et al., 2012; Simon F. W., 2020
D	Avaliar impacto ambiental da utilização do digestato	Owamah et al., 2014; Xiao et al., 2022; Askri et al., 2016; Timonen et al., 2019
E	Recuperação de metano residual	Uludag-Demirer et al., 2021
F	Produção de biomassa	Fu et al., 2022
G	Investigar rotas para a valorização do digestato	Fernandes et al., 2020
H	Revisão do processo de digestão anaeróbia	Zamri et al., 2021

Figura 4.6. Volume de publicações por objetivo dos trabalhos selecionados



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se pela Figura 4.6 que a maior parte dos trabalhos selecionados, cerca de 60%, tem como objetivo a avaliação de pós-tratamentos do digestato para uso do mesmo como fertilizante e outros produtos de valor (Objetivo A).

Estes trabalhos procuram revisar diferentes métodos de tratamento tanto do digestato cru incluindo processos de separação em frações líquida e sólida, quanto tratamentos para as respectivas frações especificamente. Nestas revisões são apresentadas vantagens e desafios de cada processo, bem como parâmetros, capacidades de operação e viabilidade econômica de cada um. Entre as vantagens mais citadas temos a alta remoção de amônia e reaproveitamento da mesma como fertilizantes nos processos de stripping de amônia, osmose reversa e precipitação de estruvita e o baixo custo do processo de compostagem. Como principais desafios citados temos, a pouca aplicação em grande escala dos processos de gaseificação, produção de células combustíveis, oxidação de amônia e pirólise e a alta demanda energética do processo de stripping de amônia.

Esses artigos relatam a grande importância técnico científica relacionada ao gerenciamento de RSU, uma vez que serviram de base para identificação dos principais processos e suas variações, que serão abordados mais adiante.

Em seguida temos o objetivo de comparação da eficiência dos pós tratamentos do digestato (Objetivo B), correspondendo a cerca de 12% dos trabalhos totais. Nestes artigos

são abordados diferentes tratamentos como, combinação do digestato com biochar para aplicação direta como fertilizante, filtração do digestato com biochar, centrifugação, filtração por membrana e osmose reversa, para comparação dos mesmos em termos de eficiência econômica, de recuperação de nutrientes e capacidade de operação.

Correspondendo a 9,5% de participação no total de publicações selecionadas, temos o objetivo de avaliação do potencial fertilizante do digestato da DA (Objetivo C), que se referem a estudos que procuraram avaliar especificamente o potencial fertilizante do produto final, descartando outras aplicações e independente dos pós tratamentos utilizados, os estudos avaliaram o potencial de nutrição deste digestato puro e combinado com outros substratos, comparando a eficiência com fertilizantes minerais e impactos ambientais gerados pelos mesmos.

Também correspondendo a 9,5% das publicações selecionadas, estão os artigos com objetivo de avaliar o impacto ambiental da utilização do digestato no solo (Objetivo D). Estes artigos revisam todo o processo da digestão anaeróbia, sua pegada de carbono e utilização do digestato para contribuir com uma produção circular, além do impacto no solo e no ar que a utilização do digestato sem e com tratamento pode trazer.

Em seguida temos trabalhos que não entraram na classificação anterior (Objetivos E, F, G e H), representando juntos 9,5% de todas as publicações selecionadas, com os objetivos de avaliar a recuperação de metano residual no digestato, produzir biomassa protéica de insetos utilizando digestato como substrato de nutrição para larvas de mosca soldado negra, investigar diferentes rotas para valorização do digestato como produto final e fazer a revisão completa da digestão anaeróbia, avaliando a interferência de diferentes pré-tratamentos nos substratos e parâmetros que possuem grande valia para análise por seu foco diferenciado e identificação de possíveis aplicações para o digestato que não somente como fertilizante.

4.2.3. DISTRIBUIÇÃO ANUAL DOS TRABALHOS RELEVANTES SELECIONADOS

Como pode ser observado na Tabela 4.1, dos 42 artigos selecionados, a grande maioria se encontra nos anos de 2021 e 2022, sendo 19 publicações no período. O que pode ser explicado pelo recorte de relevância destes artigos, sendo o tema de pós-tratamentos do digestato de FORSU ainda mais recente que a digestão anaeróbia de FORSU e

aproveitamento do digestato como um todo. A presente pesquisa abrange artigos publicados até agosto de 2022, e o volume de publicações deste ano já ultrapassa o de 2020, indicando a forte tendência de aumento de demanda por estudos deste tema. Tudo indica que ao final do ano o volume de publicações deve se equiparar ou até mesmo superar o volume de 2021.

4.2.4. PROCESSOS DE TRATAMENTO DO DIGESTATO CONSOLIDADOS

Para uma análise mais aprofundada dos pós-tratamentos aplicados ao digestato, avaliação dos processos mais consolidados e possível aplicação em larga escala no Brasil, foi feita a classificação dos 42 artigos mais relevantes com base em tratamentos aplicados ao digestato cru, onde estão incluídos tratamentos para uso final desse digestato e operações de separação sólido líquido para posterior tratamento das frações separadas, e tratamentos específicos para as frações sólida e líquida do digestato. A análise quantitativa foi feita após os tratamentos serem identificados em cada um dos artigos relevantes.

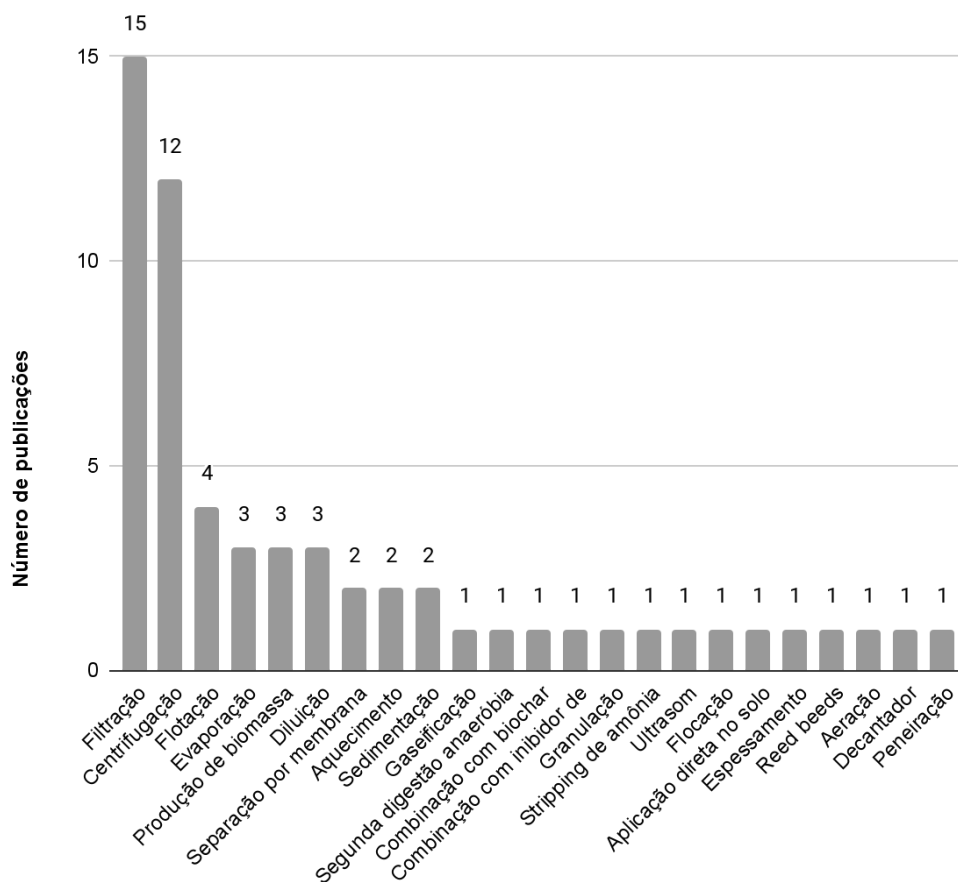
4.2.4.1. TRATAMENTOS PARA O DIGESTATO CRU

De acordo com a Figura 4.7. os principais tratamentos identificados para o digestato cru são processos de separação sólido líquido, sendo estes o processo de filtração e centrifugação, com cerca de 22% e 17% de representatividade no total de publicações, respectivamente, sendo que o terceiro lugar ficou para o processo de flotação com apenas 5,8% de representatividade.

Entre os processos de filtração foi identificada a predominância da filtração por screw press, que é um processo simples e viável economicamente, que têm portanto maior campo de aplicação, mas também foram identificados processos de filtração a vácuo, filtração com filtro prensa e filtração com biochar. O processo de centrifugação também é um processo simples e de fácil aplicação, sendo necessário pouco espaço de instalação e dificuldade de projeto.

Alguns dos artigos não identificaram qual tratamento foi utilizado para a separação sólido-líquido do digestato, portanto não estão identificados na Figura 4.7.

Figura 4.7. Tratamentos aplicados ao digestato cru identificados nos artigos selecionados



Fonte: Acervo pessoal

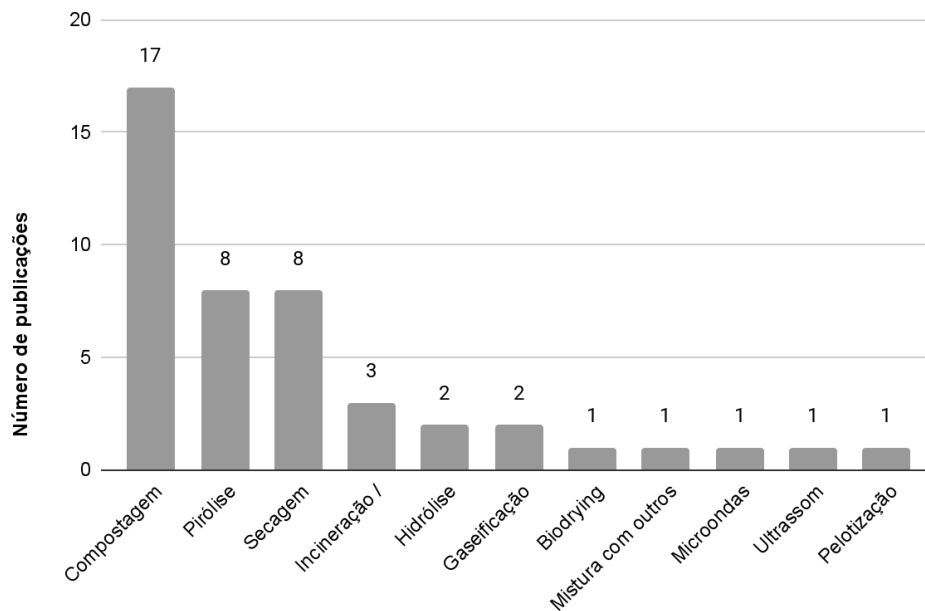
4.2.4.2. TRATAMENTOS PARA FRAÇÃO SÓLIDA

Entre 42 trabalhos avaliados, 22 estavam relacionados ao tratamento para a fração sólida. O tratamento que mais se destacou foi a compostagem, com cerca de 38% de representatividade entre as publicações selecionadas, como pode ser observado na Figura 4.8. O que pode ser explicado por ser um processo simples e de baixo custo, que pode ser aplicado em grande e pequena escala, e atualmente é também o processo mais utilizado no Brasil.

Seguindo o processo de compostagem temos os processos de pirólise e secagem, sendo observados em cerca de 18% cada das publicações relevantes selecionadas. O processo de pirólise tem gerado resultados satisfatórios com a produção de biochar, que pode ser utilizado

tanto como material fertilizante, como purificador de efluentes, entre outras aplicações que geram produtos com alto valor de mercado. Apesar de ser um processo promissor, ainda não é muito aplicado em grande escala, demandando mais pesquisas que possibilitem sua ampliação. Já o processo de secagem é um processo relativamente simples e de baixo custo, porém exige uma grande área para sua aplicação, sendo esta muitas vezes a maior dificuldade logística. Outra desvantagem do processo é que muitas vezes são necessários outros tratamentos para recuperação de nutrientes antes da aplicação final do produto.

Figura 4.8. Tratamentos aplicados a fração sólida do digestato nos artigos relevantes



Fonte: Acervo pessoal

4.2.4.3. TRATAMENTOS PARA FRAÇÃO LÍQUIDA

Entre os 42 trabalhos analisados, 16 estavam relacionados a tratamentos para a fração líquida, e entre eles temos uma melhor distribuição da diversidade de tratamentos, sendo identificados 18 tratamentos diferentes, conforme apresenta a Figura 4.9.

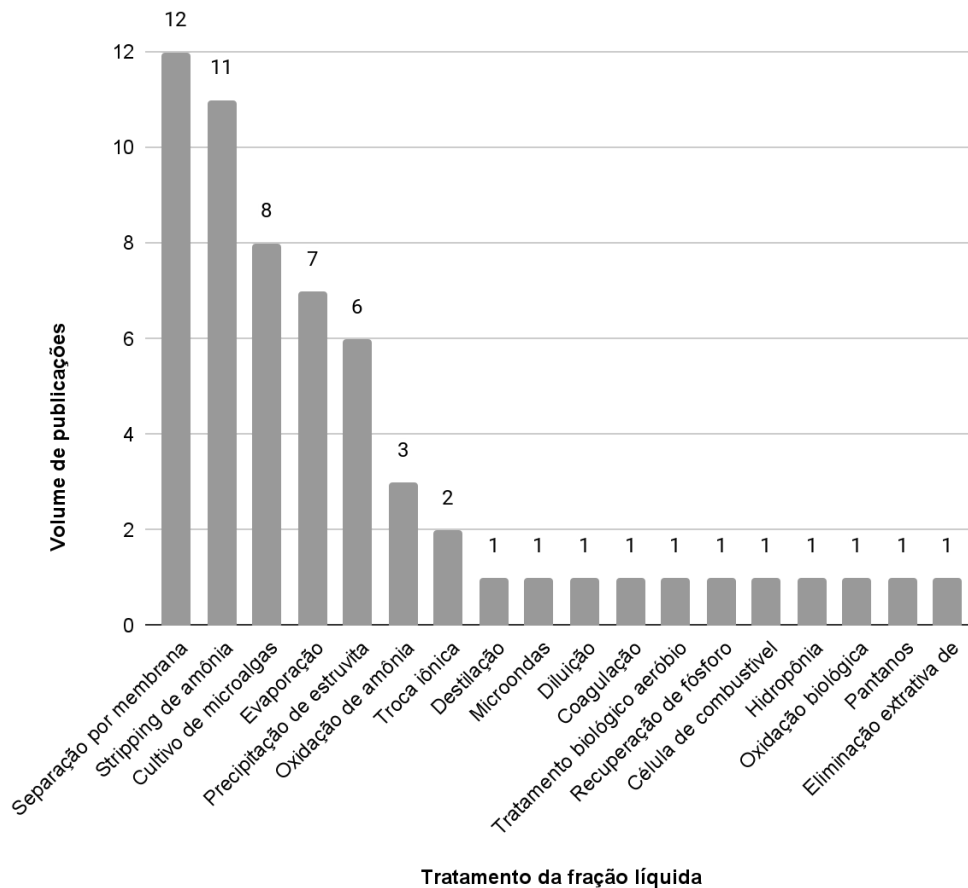
Em destaque temos o tratamento de separação por membranas que aparece em cerca de 20% das publicações. Entre os processos identificados temos diferentes tipos de membranas

classificadas por tamanho do poro de separação, existindo a predominância da osmose reversa.

Em seguida, temos o tratamento por stripping de amônia, aparecendo em cerca de 18% das publicações selecionadas, sendo o mais utilizado para recuperação do nitrogênio amoniacal, principal nutriente presente na fração líquida do digestato.

Outro tratamento que aparece em destaque é o cultivo de microalgas, com 13% das publicações selecionadas. Este tratamento vem se consolidando como tratamento de efluentes e estações de tratamento de águas residuais, e agora vem sendo aplicado também como opção de tratamento para o digestato. Apesar de ser um tratamento promissor ainda necessita de mais estudos, pois uma das dificuldades do processo é a inibição de crescimento das microalgas geradas pela amônia presente no digestato.

Figura 4.9. Tratamentos aplicados a fração líquida do digestato nos artigos selecionados



Fonte: Acervo pessoal

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou ser viável a aplicação de pós tratamentos ao digestato de FORSU que possibilitem sua utilização como produto de valor agregado e rentável economicamente. Nesses processos o digestato, que seria visto como gargalo do processo da produção de biogás e descartado como resíduo comum, ou utilizado de forma inadequada prejudicando o meio ambiente, se torna uma importante matéria prima para produção de biofertilizantes e outros produtos.

Através da análise de publicações na base de dados da Web of Science, constatou-se que nos últimos anos é crescente o número de trabalhos relacionados ao tema, demonstrando que o campo é amplamente estudado e possui capacidade de expansão, sendo o ano de 2021 com maior número de publicações. Contatou-se também que os países que mais publicaram entre os anos de 2002 e 2022 foram Itália e China com 268 e 262 publicações respectivamente, a área de pesquisa com maior volume de publicações foi a de ciências ambientais, com 713 artigos, o autor com maior representatividade na pesquisa foi Meers E, com 25 publicações, e o tipo de documento mais publicado foram os artigos de pesquisa com 83,9% de representatividade.

Entre os artigos selecionados como mais relevantes o objetivo mais observado foi a avaliação de pós-tratamentos do digestato para uso como fertilizante e outros produtos de valor, e entre eles os tratamentos mais aplicados ao digestato foram a filtração e centrifugação para o digestato cru, com 15 e 12 publicações respectivamente, a compostagem para a fração sólida do digestato, com 38% dos trabalhos selecionados como relevantes, e os tratamentos de filtração por membrana e stripping de amônia para fração líquida do digestato com 12 e 11 publicações respectivamente.

É possível concluir que uma abordagem integrada de produção de energia e aproveitamento de resíduos pode ser utilizada, na qual vários compostos de valor agregado podem ser extraídos ao longo do processo de digestão anaeróbica e depois da mesma, chegando no conceito de produção circular e redução de rejeitos.

5.2. CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O pós tratamento do digestato é fortemente afetado pelas características físico-químicas do mesmo e necessidade de aplicação final. Alguns desses processos apresentam um alto custo de instalação e demanda energética, então também deve ser realizada uma análise de viabilidade econômica antes da escolha do tratamento adequado.

Algumas aplicações do digestato após tratamento incluem a produção de biofertilizantes, cultivo de microalgas, produção de biochar e combustíveis, cultivo de biomassa protéica, entre outros.

Para obter um digestato de forma satisfatória primeiramente deve ser realizada a correta gestão e coleta de resíduos, de forma que esses apresentem quantidades pequenas de contaminantes e excesso de materiais poliméricos, depois os parâmetros da digestão anaeróbia devem ser controlados podendo até serem otimizados para maior concentração de nutrientes do digestato, e por fim deve ser realizada a caracterização e escolha do pós-tratamento adequado para este digestato.

Como forma de avançar nas análises que foram descritas nesta pesquisa, sugere-se que outros estudos sejam realizados a fim de monitorar o avanço das tecnologias e implementações de plantas em larga escala para tratamento do digestato como produto de valor da digestão anaeróbia, e não somente um resíduo.

Através do estudo destas publicações, sugere-se determinar quais os melhores processos de pós-tratamento visando aspectos técnicos e econômicos, de plantas para instalação no Brasil, visando o aumento do benefício da digestão anaeróbia como processo de tratamento de FORSU, gerando uma produção circular amiga do meio ambiente.

Além disso, essas análises também permitem demonstrar como os estudos têm evoluído no mundo, de forma que podem ser replicados para o Brasil, sendo este um país com a agricultura como base.

Outro ponto importante a ser estudado, por ser um dos gargalos do processo, é a falta de legislação para biofertilizantes da DA, que gera um preconceito com esses produtos e dificuldade de inserção no mercado, não sendo possível assim competir com os fertilizantes minerais de igual eficiência nutricional porém que agridem o meio ambiente. Se faz necessário um maior volume de pesquisas sobre esse tema para que sejam criadas legislações específicas para estes produtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS. **O potencial brasileiro de biogás.** 2020. Disponível em: https://abiogas.org.br/wpcontent/uploads/2020/11/NOTATECNICA_POTENCIAL_A_BIOGAS.pdf. Acesso em: 05 jul. 2022.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020.** Abrelpe.org, dez. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama>. Acesso em: 22 jul. 2022

ANGOURIA-TSOROCHIDOU, E.; SEGHETTA, M.; TRÉMIER, A.; THOMSEN, M. **Life cycle assessment of digestate post-treatment and utilization.** Science of The Total Environment. v. 815, p. 152764, Abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152764>

AREESHI, M.Y. **Recent advances on organic biofertilizer production from anaerobic fermentation of food waste: Overview.** International Journal of Food Microbiology. v. 374, p. 109719, Mai, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109719>

ASKRI, A.; LAVILLE, P.; TREMIER, A.; HOUT, S. **Influence of Origin and Post-treatment on Greenhouse Gas Emissions After Anaerobic Digestate Application to Soil.** Waste Biomass Valor. v. 7, p. 293–306, Dez. 2015. DOI 10.1007/s12649-015-9452-6

AYREA, J.M.; MICKAN, B.S.; JENKINS, S.N., MOHEIMANIA, N.R. **Batch cultivation of microalgae in anaerobic digestate exhibits functional changes in bacterial communities impacting nitrogen removal and wastewater treatment.** Algal Research. v. 57, p. 102338, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102338>

AZEVEDO, I. M. A. P.; CERQUEIRA, P. T. P. **Eficiência de um filtro prensa e análise por campo de risco em uma estação de pré tratamento de efluentes industriais.** Niterói - RJ, 2017

BARUA, P.; HOSSAIN, N. **Waste to energy: an overview by global perspective. Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals.** Woodhead Publishing, v. 32, p. 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823139-5.00011-3>

BATTISTA, F.; BOLZONELLA, D. **Exploitation of Solar Energy for Ammonium Sulfate Recovery from Anaerobic Digestate of Different Origin.** Waste and Biomass Valorization. v. 10, p. 3701–3709, Fev. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00597-x>

BERNAL, M. P.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; PAREDES, C.; ROIG, A. **Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil.** Agriculture Ecosystems & Environment. Volume 69, Issue 3, Pages 175-189, Jul. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00106-6)

BLACKADDER, D.A. **Manual de operações unitárias.** Londres: Hemus, 2004.

BONG, C.P.C.; LIM, L.Y.; LEE, C.T.; KLEMES, J.J.; HO, C.S.; HO, W.S. **The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – A review.** Journal of Cleaner Production. v. 172, 20. p. 1545-1558, Jan.2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.199>

BRASIL, **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n° 61**, de 23 de julho de 2020. DOU, Brasília, 2020.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 375**, de 29 de agosto de 2006. Brasília, 2006.

BRIGADÃO, V.; WIESBERG, I.L.; PINTO, J.L.; ARAÚJO, O.Q.F.; MEDEIROS, J.L. **Upstream and downstream processing of microalgal biogas: Emissions, energy and economic performances under carbon taxation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 112, p. 508-520, Set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.009>

BROWN, D., LI, Y. **Solid state anaerobic co-digestion of Yard waste and food waste for biogas production.** Bioresource Technology, Volume 127. Pages 275-280. Jan. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.081>

CENTORCELLI, J.; DRAPANAUSKAITE, D.; HANDLER, R.M.; BALTRUSAITIS, J. **Solar Steam Generation Integration into the Ammonium Bicarbonate Recovery from Liquid Biomass Digestate: Process Modeling and Life Cycle Assessment.** ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 9 (45), p. 15278-15286, Nov, 2021. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05410>

CHAHER, N.E.H.; NASSOUR, A.; HAMDI, M.; NELLES, M. **Digestate Post-treatment and Upcycling: Unconventional Moisturizing Agent for Food Waste In-Vessel Composting.** Waste and Biomass Valorization. v. 13, p. 1459–1473, Out. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01565-0>

CHEONG, J.C.; LEE, J.T.E.; LIM, J.W.; SONG, S.; TAN, J.K.N.; CHIAM, Z.Y.; YAPA, K.Y.; LIM, E.Y.; ZHANG, J.; TAN, H.T.W.; YONG, Y.W. **Closing the food waste loop: Food waste anaerobic digestate as fertilizer for the cultivation of the leafy vegetable, xiao bai cai (Brassica rapa).** Science of the Total Environment. v. 715, p. 136789, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136789>

CHERNICHARO, C.A.L. de. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. v.5.

DANTAS, G.R.; LEITE, V.D.; COSTA, E.M. **Microbial diversity study in anaerobic digestion.** Congresso Brasileiro de Microbiologia Agropecuária Agrícola e Ambiental (CBMAAA), Centro de Convenções da UNESP, Jaboticabal, 2016.

DUTTA, S.; HE, M.; XIONG, X.; TSNAG, D.C.W.; **Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review.** Bioresource Technology. v. 341, p. 125915, Set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125915>

ERKAN, M.; SANIN, F.D. **Can sludge dewatering reactivate microorganisms in mesophilically digested anaerobic sludge? Case of belt filter versus centrifuge.** Water Research. v. 47, i. 1,1, p. 428-438, Jan. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.028>

EZEA, V.C.; VELASQUEZ-ORTA, S.B.; HERNÁNDEZ-GARCÍA, A.; MONJE-RAMÍREZ, I.; ORTA-LEDESMA, M.T. **Kinetic modeling of microalgae cultivation for wastewater treatment and carbon dioxide sequestration.** Algal Research. v. 32, p. 131-141, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.03.015>

FERNANDES, F.; DA SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos.** PROSAB/FINEP, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 1996

FERNANDES, F.; SILKINA, A.; FUENTES-GRUNEWALD, C.; WOOD, E.E.; NDOVELA, V.L.S.; OATLEY-RADCLIDDE, D.L.; LOVITT, R.W.; LLEWELLYN, C.A. **Valorising nutrient-rich digestate: Dilution, settlement and membrane filtration processing for optimisation as a waste-based media for microalgal cultivation.** Waste Management. v. 118, p. 197-208, Set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.037>

FLOTTWEG. **Modo de funcionamento da centrífuga decanter.** Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 02 ago. 2022.

FOUST, A.S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSON, L. B. **Princípio das Operações Unitárias.** Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FRANCO, A.F.T.; ARAÚJO, S.E.; PASSOS, F.; CHERNICHARO, C.A.L.; MOTA FILHO, C.R.; FIGUEIREDO, C.C. **Treatment of food waste digestate using microalgaebased systems with low-intensity light-emitting diodes.** Water Sci Technol. v. 78, p. 225–234, Ago, 2018. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.198>

FU, S.; WANG, D.; XIE, Z.; ZOU, H.; ZHENG, Y. **Producing insect protein from food waste digestate via black soldier fly larvae cultivation: A promising choice for digestate disposal.** Science of the Total Environment. v. 830, p. 154-654, Mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154654>

FUCHS, W.; DROSG, B. **Assessment of the state of the art of technologies for the processing of digestate residue from anaerobic digesters.** Water Sci Technol. v. 67 (9), p. 1984–1993, Mai. 2013. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.075>

GENIN, C.; FRASSON, C. M. R. **O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima**

significou para o Brasil e o mundo. WRI Brasil, nov. 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 22 jul. 2022.

GUILAYN, F.; ROUEZ, M.; CREST, M.; PATUREAU, D.; JIMENEZ, J. **Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. v. 19, p. 419–462, Mai. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09531-3>

HERBES, C.; ROTH, U.; WULF, S.; DAHLIN, J. **Economic assessment of different biogas digestate processing technologies: A scenario-based analysis.** Journal of Cleaner Production. v. 255, p. 120282. Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120282>

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos: Relatório de Pesquisa.** Brasília, 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 24 jul. 2022

JOAN, S.; RAJABZADEH, S.; OKAMURA, R.; ISHIGAMI, T.; HASEGAWA, S. KATO, N.; MATSUYAMA, H. **The Effect of Membrane Material and Surface Pore Size on the Fouling Properties of Submerged Membranes.** Water. v. 8, p. 602, Dez. 2016. <https://doi.org/10.3390/w8120602>

KHAN, I. U.; OHTMAN, M. H. D.; HASHIM, H.; MATSUURA, T.; ISMAIL, A.F; RAZAEI-DASHTARZHANDI, M.; AZELEE, I.W. **Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage.** Energy Conversion and Management. Volume 239, Pages 277-294, ago. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>.

KNOOP, C.; TIETZE, M.; DORNACK, C.; RAAB, T. **Fate of nutrients and heavy metals during two-stage digestion and aerobic post-treatment of municipal organic waste.** Bioresource Technology. v. 251, p. 238-248, Dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.019>

KUMAR, A.; SAMADDER, S.R. **Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review.** Energy. v. 197, p. 117253, Abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>

LAMOLINARA, B.; PÉREZ-MARTINEZ, A.; GUARDADO-YORDI, E.; FIALLOS, C.G.; DIÉGUEZ-SANTANA, K.; RUIZ-MERCADO, G.J. **Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges.** Waste Management. v. 140, p. 14-30, Dez, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.035>

LEE, J.T.E.; OK, Y.S.; SONG, S.; DISSANAYAKE, P. D.; TIAN, H.; TIO, Z.K.; CUI, R.; LIM, E.Y.; JONG, M.; HOY, S.H.; LUM, T.Q.H.; TSUI, T.; YOON, C.S.; DAI, Y.; WANG, C.; TAN, H.T.W.; TONG, T.W. **Biochar utilization in the anaerobic digestion of food waste for the creation of a circular economy via biogas upgrading and digestate treatment.** *Bioresource Technology.* v. 333, p. 125190. Abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125190>

LEE, M.E.; STEIMAN, M.W.; ST. ANGELO, S.K. **Biogas digestate as a renewable fertilizer: effects of digestate application on crop growth and nutrient composition.** *Renewable Agriculture and Food Systems.* v. 36, p. 173-181. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000186>

LOGAN, M.; VISVANATHAN, C. **Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects.** *Waste Management & Research.* v. 37, p. 27–39, Out. 2018. <https://doi.org/10.1177/0734242X18816793>

LU, J.; XU, S. **Post-treatment of food waste digestate towards land application: A review.** *Journal of Cleaner Production.* v. 303, p. 127033, Abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127033>

MA, Y.; SHEN, Y.; LIU, Y. **Food Waste to Biofertilizer: A Potential Game Changer of Global Circular Agricultural Economy.** *J. Agric. Food Chem.* 2020, 68, 18, 5021–5023, Abr. 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02210>

MA, Y.; SHEN, Y.; LIU, Y. **Food Waste to Biofertilizer: A Potential Game Changer of Global Circular Agricultural Economy.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020 68 (18), 5021-5023. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c02210

MANGWANDI, C.; TAO, L.J.; ALBADARIN, A.B.; ALLEN, S.J.; WALKER, G.M. **Alternative method for producing organic fertilizer from anaerobic digestion liquor and limestone powder: High Shear wet granulation.** *Powder Technology.* v. 233, p. 245-254, Set. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.017>

MANU, M.K.; LI, D.; LIWEN, L.; JUN, Z.; VARJANI, S.; WONG, J.W.C. **A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste digestate composting.** *Bioresource Technology.* v. 334, p. 125032, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125032>

MASEE, L.; MASSE, D.I.; PELLERIN, Y. **The use of membranes for the treatment of manure: a critical literature review.** *Biosystems Engineering.* v. 98, p. 371-380, Dez. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.003>

MEEGODA, J.N.; LI, B.; PATEL, K.; WANG, L.B.; **A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion.** *Int. J. Environ. Res. Public Health.* v. 15(10), p. 2224, Out. 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>

MERCKEL, A. J. **Managing livestock wastyes**. Westport: Avi Publishing Company, 1981.

MICKAN, B.S.; REN, A.; BUHLMANN, C.H.; GHADOUANI, A.; SOLAIMAN, Z.M.; JENKINS, S.; PANG, J.; RYAN, M.H. **Closing the circle for urban food waste anaerobic digestion: The use of digestate and biochar on plant growth in potting soil**. Journal of Cleaner Production. v. 347, p. 131071, Mai. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131071>

MONFET, E.; AUBRY, G.; RAMIREZ, A.A. **Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology**. Biofuels, v. 9:2, p. 247-262, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336348>

MU, L.; ZHANG, L.; ZHU, K.; MA, J.; IFRAN, M.; LI, A. **Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production**. Science of The Total Environment. v. 704,20, p. 135429, Fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135429>

NASCIMENTO, V.F.; SOBRAL, A.C.; ANDRADE, P.R.; OMETTO, J.P.H.B. **Development and challenges in Brazilian municipal solid waste management**. Rev. Ambient. Água 10 (4), Dez. 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1635>

NICOLOSO, R. da S.; BARROS, E.C.; **Manual de dimensionamento e manejo de unidades de compostagem de animais mortos para granjas de suínos e aves – EMBRAPA**., Concórdia, SC, 2019.

NWOBA, E.G.; MICKAN, B.S.; MOHEIMANI, N.R. **Chlorella sp. growth under batch and fed-batch conditions with effluent recycling when treating the effluent of food waste anaerobic digestate**. Journal of Applied Phycology. v. 31. p. 3545–3556, Ago. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01878-7>

O’CONNOR, J.; MICKAN, B. S.; RINKLEBE, J.; SONG, H., SIDDIQUE, K. H. M.; WANG, H.; KIRKHAM, M.B.; NANTHI, S.B. **Environmental implications, potential value, and future of food-waste anaerobic digestate management: A review**. Journal of Environmental Management, v. 318, p. 115519, Set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115519>

OECO. **GASES do efeito estufa: Dióxido de Carbono (CO2) e Metano (CH4)**. Dicionário Ambiental. ((o)eco, Rio de Janeiro, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28261-gases-do-efeito-estufa-dioxido-de-carbono-co2-e-metano-ch4/>>. Acesso em: 02 ago. 2022.

OLESZEK, M., KROL, A., TYS, J., MATYKA, M., Kulik, M., 2014. **Comparison of biogas production from wild and cultivated varieties of reed canary grass**. Bioresour.Technol, v.156, p.303-306, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.055>

OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T.B. **Compostagem - EMBRAPA**. mai. 2008. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Compostagem_000fhc8nfqz02wyiv80efhb2adn37yaw.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2021.

OUR WORLD IN DATA. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. OurWorldInData.org, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 22 jul. 2022.

OUR WORLD IN DATA. **Emissions by sector**. OurWorldInData.org, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>. Acesso em: 22 jul. 2022.

OWAMAH, H.I.; DAHUNSI, S.O.; ORANUSI, U.S.; ALFA, M.I. **Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta**. Waste Management. v. 34, p. 747-752, Fev. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.017>

PENG, W.; LU, F.; HAO, L.; ZHANG, H.; SHAO, L.; HE, P. **Digestate management for high-solid anaerobic digestion of organic wastes: A review**. Bioresource Technology. v. 297, p. 122485, Fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122485>

PENG, W.; PIVATO, A. **Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy**. Waste Biomass Valor. v. 10, p. 465–481, Set. 2017. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0071-2>

PENG, W.; ZHANG, H.; LU, F.; SHAO, L.; HE, P. **Char derived from food waste based solid digestate for phosphate adsorption**. Journal of Cleaner Production. v. 297, p. 126687, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126687>

PEÑUELAS, J.; SARDANS, J.; ESTIARTE, M.; OGAYA, R.; CARNICER, J.; COLL, M.; BARBETA, A.; RIVAS-UBACH, A.; LLUSIÀ, J.; GARBULSKY, M.; FILELLA, I.; JUNP, A.S. **Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere**. Global Change Biology. v. 19. i. 8., Jan. 2013. <https://doi.org/10.1111/gcb.12143>

POINCELOT, R. P. **The Biochemistry and Methodology of Composting**. The Connecticut Agricultural Experiment Station, New Haven. Vol. 754., 1975.

RAM, C.; KUMAR, A.; RANI, P. **Municipal Solid Waste Management: A Review of Waste to Energy (WtE) Approaches**. Bioresources, Volume 16(2), Pages 4275-4320, Mar. 2021. DOI: 10.15376/biores.16.2.Ram

REHL, T.; MULLER, J. **Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. Resources**. Conservation and Recycling. v. 56, i. 1, p. 92-104. Nov. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.007>

REN, Y.; YOU, M.; WU, C.; WANG, Q.; GAO, M.; HUANG, Q.; LIU, Y. **A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies.** Bioresource Technology. v. 247, p. 1069-1076, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109>

ROMERO-GUIZA, M., VILA, J., MATA-ALVAREZ, J., CHIMENOS, J., ASTALS, S. **The role of additives on anaerobic digestion: a review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 58. Pages 1486–1499. Mai. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A.R.; CARSWHEEL, A.M.; SHAW, R.; HUNT, J.; SAUNDERS, K.; COTTON, J.; CHADWICK, D.R.; JONES, D.L.; MISSELBROOK, T.H. **Advanced Processing of Food Waste Based Digestate for Mitigating Nitrogen Losses in a Winter Wheat Crop.** Front. Sustain. Food Syst. 2:35, Jul. 2018. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00035>

SAVEYN, H., EDER, P. **End-of-Waste Criteria for Biodegradable Waste Subjected to Biological Treatment (Compost & Digestate): Technical Proposals.** IPTS of the European Union, 2014. <https://asset-pdf.scinapse.io/prod/1589332136/1589332136.pdf>.

SCHUMER, C.; BOEHM, S.; FRANSEN, T.; HAUSKER, K.; DELLESKY, C. **6 conclusões do relatório do IPCC de 2022 sobre mitigação das mudanças climáticas.** WRI Brasil, abr. 2022. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/noticias/6-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-mitigacao-d-as-mudancas-climaticas>. Acesso em: 22 jul. 2022.

SFETSAS, T.; PATSATZIS, S.; CHIOTI, A.; KOPTEROPOULOS, A.; DIMITROPOULOU, G.; TSIONI, V.; KOTSOPOULOS, T. **A review of advances in valorization and post-treatment of anaerobic digestion liquid fraction effluent.** Waste Management & Research. v. 40, p. 1093–1109, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1177/0734242X211073000>

SHANTA, D.; HE, M.; XIONG, X.; TSANG, D. C. W. **Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review.** Bioresource Technology, Hong Kong, Volume 341, dez, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125915>

SHEETS, J.P.; YANG, L.; GE, X.; WANG, Z.; LI, Y. **Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste.** Waste Management. v., p. 94-115, Out. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.037>

SIMON, F.W. **Valorização do digestato proveniente da digestão anaeróbia de resíduos alimentares.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - UFSC. Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216032>

SINGH, M.; SINGH, D.; GUPTA, A. PANDEY, K.D.; SINGH, P.K.; KUMAR, A. **Chapter Three - Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Application in Biofertilizers and Biocontrol of Phytopathogens.** PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture, Food Security and Environmental Management. p. 41-66, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815879-1.00003-3>

SONG, S.; LIM, J.W.; LEE, J.T.E.; CHEONG, J.C.; HOY, S.H.; HU, Q.; TAN, J.K.N.; CHIAN, Z.; ARORA, S.; LUM, T.Q.H.; LIM, E.Y.; WANG, C.; TAN, H.T.W.; TONG, Y.W. **Food-waste anaerobic digestate as a fertilizer: The agronomic properties of untreated digestate and biochar-filtered digestate residue.** Waste Management. v. 136, p. 143-152, Out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.011>

STOKNES, K.; SCHOLWIN, F.; KRZESINSKI, W.; WOJCIECHOWSKA, E.; JASIN, A. **Efficiency of a novel “Food to waste to food” system including anaerobic digestion of food waste and cultivation of vegetables on digestate in a bubble-insulated greenhouse.** Waste Management. v.56, p. 466-476, Out. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.027>

SVOBODA, N.; TAUBE, F.; WIENFORTH, B.; KLUB, C.; KAGE, H.; HERRMANN, A. **Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize.** Soil and Tillage Research. v. 130, p. 69-80, Jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.006>

SZIGETHY, L.; ANTENOR, S. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos.** IPEA, jul. 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 22 jul. 2022.

TAHIR, P.M.; LIEW, W.; LEE, S.Y.; ANG, A.F.; LEE, S.H.; MOHAMED, R.; HALIS, R. **Diversity and characterization of lignocellulolytic fungi isolated from oil palm empty fruit bunch, and identification of influencing factors of natural composting process.** Waste Management. v. 100, p. 128-137, Dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.002>

TAMBONE, F.; ORZI, V.; D'IMPORZANO, G.; ADANI, F. **Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value.** Bioresource Technology. v. 243, p. 1251-1256, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.130>

TAMPIO, E.; MARTTINEN, S.; RINTALA, J. **Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems.** Journal of Cleaner Production. v. 125, p. 22-32, Abr. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.127>

The Nature Conservancy. **O último relatório do IPCC: O que é e por que ele é importante?**. The Nature Conservancy, mar. 2022. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/conecte-se/comunicacao/noticias/ipcc-report-climate-change/>. Acesso em: 22 jul. 2022

TIMONEN, K.; SINKKO, T.; LUOSTARINEN, S.; TAMPIO, E.; JOENSUU, K. **LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate**. Journal of Cleaner Production. v. 235, p. 1567-1579, Out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.085>

TORNWALL, E.; PETTERSSON, H.; THORIN, E.; SCHWEDE, S. **Post-treatment of biogas digestate – An evaluation of ammonium recovery, energy use and sanitation**. Energy Procedia. v. 142, p. 957-963, Dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.153>

ULUDAG-DEMIRER, S.; DEMIRER, G.N. **Post-anaerobic treatability and residual biogas potential of digestate**. Biomass Conv. Bioref. v. 12, p. 1695–1702, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01290-7>

UNEP. **As emissões de metano estão impulsionando a mudança climática. Veja como reduzi-las**. Ago. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/emissoes-de-metano-estao-impulsionando-mudanca-climatica-veja>. Acesso em: 22 jul. 2022.

VALLINI, G. Compostaggio. **In: La protezione dell'ambiente in Italia**. Ed. Bertini, I., Cipollini, R., Tundo, P. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Società Chimica Italiana e Consorzio Interuniversitario Chimica per l'Ambiente, 1995.

WANG, J.; YANG, H.; WANG, F. **Mixotrophic Cultivation of Microalgae for Biodiesel Production: Status and Prospects**. Algal Research. v. 32, p. 131-141, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.03.015>

XIA, A.; MURPHY, J.D.; **Microalgal Cultivation in Treating Liquid Digestate from Biogas Systems**. Trends in Biotechnology. v. 34, i. 4, p. 264-275, Abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.12.010>

XIAO, H.; ZHANG, D.; TANG, Z.; LI, K.; GUO, H.; NIU, X.; YI, L. **Comparative environmental and economic life cycle assessment of dry and wet anaerobic digestion for treating food waste and biogas digestate**. Journal of Cleaner Production. v. 338, p. 130674, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130674>

XU F., LI, Y., GE, X., YANG, L., LI, Y. **Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities**. Bioresource Technology. Volume 247. Pages 1047-1058. Jan, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>

XU, F.; LI, Y.; GE, X.; YANG, L.; LI, Y. **Anaerobic digestion of food waste – challenges and opportunity**. Bioresource Technology. v. 247, p. 1047-1058. Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>

YU, F.; LUO, X.; SONG, C.; ZHANG, M.; SHAN, S. **Concentrated biogas slurry enhanced soil fertility and tomato quality.** Acta Agriculturae Scandinavica. v. 60, p. 262-268, Jul. 2009. <https://doi.org/10.1080/09064710902893385>

ZAMRI, M.F.M.A.; HASMADY, S.; AKHIAR, A.; IDERIS, F.; SHAMSUDDIN, A.H., MOFIJUR, M.; RIZWANUL, F.; MAHLIA, T.M.I. **A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 137, p. 110637, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110637>

ZENG, Y.; GUARDIA, A.; DABERT, P. **Improving composting as a post-treatment of anaerobic digestate.** Bioresource Technology. v. 201, p. 293-303, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.013>

ZHANG, J.; GU, D.; CHEN, J.; HE, Y.; DAI, Y.; LOH, K.; TONG, Y.W. **Assessment and optimization of a decentralized food-waste-to-energy system with anaerobic digestion and CHP for energy utilization.** Energy Conversion and Management. v. 228,15, p. 113654, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113654>