

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 18/08/2026

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until August 18, 2026

ESTELA GATO FERREIRA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA A
PARTIR DO RESÍDUO LIGNOCELULÓSICO DO LÚPULO E DEJETO DE
BOVINOS**

**Botucatu
2024**

ESTELA GATO FERREIRA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA A PARTIR
DO RESÍDUO LIGNOCELULÓSICO DO LÚPULO E DEJETO DE BOVINOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção de título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Sarita Cândida Rabelo

Coorientadora: Valeria Cristina Rodrigues
Sarnighausen

Botucatu

2024

F383p

Ferreira, Estela Gato

Produção de biogás via integração lavoura-pecuária a partir do resíduo lignocelulósico do lúpulo e de dejetos de bovinos / Estela Gato Ferreira. -- Botucatu, 2024

167 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientadora: Sarita Cândida Rabelo

Coorientadora: Valeria Cristina Rodrigues Sarnighausen

1. Biometano. 2. Manejo de resíduos. 3. Caule de lúpulo. 4. Pré-tratamento. 5. Bioenergia. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA A PARTIR DO
RESÍDUO LIGNOCELULÓSICO DE LÚPULO E DEJETO DE BOVINOS**

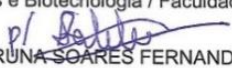
AUTORA: ESTELA GATO FERREIRA

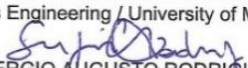
ORIENTADORA: SARITA CÂNDIDA RABELO

COORIENTADORA: VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia
Agrícola, pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. SARITA CÂNDIDA RABELO (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas - Campus de Botucatu


Prof.ª Dr.ª BRUNA SOARES FERNANDES (Participação Virtual)
Biosystems Engineering / University of Manitoba


Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas - Unesp

Botucatu, 18 de janeiro de 2024.

Dedico esta dissertação à minha mãe e irmãos,

Renata, Henrique e Igor

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Sarita, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de comprometimento e dedicação.

À Profa. Dra. Valeria pela contribuição e ensinamentos no decorrer das atividades.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus queridos pais, avós, tios e padrinhos pelo apoio e incentivo incondicional.

Ao meu irmão Henrique, que me incentivou desde o começo, e pelo apoio, amor e compreensão durante este período.

À Nathalia Lara, minha companhia preferida desde a graduação até os dias de hoje, que me apoiou em todas as fases e obstáculos, com muito amor e paciência, fundamental para a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

À minha querida amiga Nathalia Lossolli pelo apoio e incentivo durante a pós-graduação, sempre presente, atenciosa, amorosa e paciente, que tornou os dias difíceis mais leves.

Às minhas queridas amigas e colegas da área de pesquisa, Ingrid Lorena e Nathalia Barbosa, pelo incentivo e ajuda na minha trajetória pessoal e acadêmica, me acolhendo sempre com muita paciência e carinho, vibrando pelo meu sucesso e felicidade.

À Michelle, pela ajuda e atenção na realização de diversas atividades e etapas pertinentes a esta pesquisa.

Aos meus colegas da área de pesquisa do Laboratório de Bioenergia e Produtos Renováveis (LBPR), Guilherme, Karine e Luiz, sempre atenciosos e prestativos.

À minha amiga e colega da área de pesquisa, Lara Resende, pelo incentivo, ajuda e parceria durante algumas fases de desenvolvimento deste trabalho, assim como em momentos de descontração. Sempre prestativa, paciente e carinhosa.

Ao técnico de laboratório, Marcelo, pela paciência e ajuda, desde o meu primeiro dia de atividade em laboratório. Sempre prestativo e proativo, e me proporcionou risadas em meio a rotina maçante.

RESUMO

A bioenergia, especialmente o biogás, vem despertando grande interesse mundial devido à crescente demanda energética e viabilidade técnico-econômica. Neste mercado, os dejetos bovinos, muitas vezes mal gerenciados e poluentes, são uma fonte de energia significativa, com volume expressivo de matéria-prima. Além disso, devido à expansão do cultivo de lúpulo (*Humulus lupulus L.*) no Brasil, os resíduos gerados em sua poda também podem ser utilizados na digestão anaeróbica (DA), sendo uma alternativa de manejo e aproveitamento. Sendo assim, a junção destes resíduos pode promover uma integração da cadeia lavoura-pecuária, proporcionando um manejo adequado através da geração de bioenergia e biofertilizante. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial metanogênico do resíduo da cultura do lúpulo em processos de mono e co-digestão (co-DA) com dejetos de bovinos. A biomassa lignocelulósica foi pré-tratada hidrotermicamente em três condições, 175, 190 e 205°C por 10 min, visando avaliar como a severidade do processo influencia na biodegradabilidade do material. Os ensaios de DA foram avaliados empregando a biomassa in-natura, pré-tratada integralmente (lama) e utilizando apenas a fração líquida (hidrolisado hemicelulósico, HH), em processos de mono e co-DA. Ao final do processo, o digestato de cada ensaio foi avaliado quimicamente e biologicamente a fim de mensurar as modificações na microbiota e seu potencial de aplicabilidade. Os resultados indicaram que a condição mais severa de pré-tratamento (205°C, 10 min) proporcionou a maior produção acumulada de biometano em processos de mono e co-DA, empregando tanto o HH quanto a lama de pré-tratamento. Nesta condição, considerando o processo de mono-DA, a lama e o HH proporcionaram uma produção de biometano 84,78 e 57,27% maior, respectivamente, quando comparado à biomassa in-natura. Já para o processo de co-DA, a mistura da lama com o dejetos promoveu um aumento da produção de biometano de 220,66% quando comparado a mistura da biomassa in-natura com o dejetos. Quanto a mistura de HH e dejetos, houve um aumento de 167,45% na produção de biometano em relação à mistura da biomassa in-natura e dejetos, demonstrando, em ambos os casos, a importância da etapa de pré-tratamento da biomassa. As análises do digestato indicaram seu potencial como biofertilizante, demonstrando a presença de nutrientes essenciais disponíveis para a nutrição de plantas. A microbiota detectada nos digestatos apresentou grupos de bactérias e arqueas essencialmente relevantes para as

diferentes etapas do processo de DA, indicando bom desempenho do sistema e a falta de patógenos ao final do processo.

Palavras chave: bioenergia; manejo de resíduos; caule de lúpulo; pré-tratamento; biometano.

ABSTRACT

Bioenergy, especially biogas, has been attracting great interest worldwide due to growing energy demand and technical-economic viability. In this market, cattle waste, often poorly managed and polluting, is a significant source of energy, with a significant volume of raw material. Furthermore, due to the expansion of hop cultivation (*Humulus lupulus* L.) in Brazil, the residues generated from its pruning can also be used in anaerobic digestion (AD), providing an alternative for management and use. Therefore, combining these residues can promote integration of the crop-livestock chain, providing adequate management through the generation of bioenergy and biofertilizers. Therefore, this work aimed to evaluate the methanogenic potential of hop crop residue in mono- and co-digestion (co-DA) processes with cattle waste. The lignocellulosic biomass was pre-treated hydrothermally under three conditions, 175, 190, and 205°C for 10 min, aiming to evaluate how the severity of the process influences the biodegradability of the material. The AD assays were evaluated using raw biomass, pretreated (slurry), and using only the liquid fraction (hemicellulosic hydrolyzate, HH), in mono and co-AD processes. At the end of the process, of each assay was chemically and biologically evaluated to measure the changes in the microbiota and their potential applicability. The results indicated that the most severe pretreatment condition (205°C, 10 min) provided a greater accumulated production of biomethane in mono- and co-AD processes, employing both HH and slurry. In this condition, considering the mono-AD process, the slurry and HH provided 84.78 and 57.27% higher biomethane production, respectively, when compared to raw biomass. As for the co-AD process, mixing slurry with manure promoted an increase in biomethane production of 220.66% compared to mixing raw biomass with manure. As for the mixture of HH and manure, there was a 167.45% increase in biomethane production concerning the mixture of raw biomass and manure, demonstrating, in both cases, the importance of the pretreatment step. Analyzes of the digestate indicated its potential as a biofertilizer, demonstrating the presence of essential nutrients available for plant nutrition. The microbiota detected in the digestates presented groups of bacteria and archaea essentially relevant to the different stages of the AD process, indicating the good performance of the system and the lack of pathogens at the end of the process.

Keywords: bioenergy; waste management; hop stem; pretreatment; biomethane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma das atividades executadas no projeto	25
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira e média mundial	26
Figura 3 - Etapas básicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbica.....	32
Figura 4 - Porcentagem de produção de biogás (barra laranja escura) e do número de plantas em operação no país (barra laranja clara), considerando cada um dos setores produtivos.	36
Figura 5 - Número de plantas e volume de produção de biogás nos Estados	37
Figura 6 - Desenho esquemático da planta de lúpulo	40
Figura 7 - Sistema radicular da planta do lúpulo	41
Figura 8 - Parte aérea da planta do lúpulo	42
Figura 9 - Inflorescência (cones) da planta feminina.....	43
Figura 10 - Emissões de metano pelo setor agropecuário	51
Figura 11 - Processo de separação manual dos caules (a) e a biomassa limpa, preparada e moída (b), para uso nos ensaios.....	59
Figura 12 - Dejetos in-natura homogeneizados	61
Figura 13 - Biodigestor Canadense da Fazenda Campestre (a) e coleta do inóculo (b)	62
Figura 14 - Sistema de pré-tratamento. Banho de aquecimento de fluido térmico (a) e um exemplo do reator empregado nos ensaios (b)	63
Figura 15 - Sistema de determinação do volume de biogás (a) e biorreator (b)	75
Figura 16 - Bandas de DNA obtidas em géis de agarose.....	84
Figura 17 - Preparação da biblioteca através do Index disponibilizados pela Illumina	86
Figura 18 - Biomassa pré-tratada na condição 190°C, 10 min: lama obtida após o pré-tratamento (a), e hidrolisado hemicelulósico (HH) (b), e celulignina (c) após a etapa de separação sólido/líquido	88
Figura 19 - As reações de hidrólise da celulose e hemiceluloses levando à formação de furfural, HMF, ácido levulínico e fórmico, além da humina	93
Figura 20 - Produção de metano obtida na DA dos HHs.....	107
Figura 21 - Produção de metano obtida na DA das lamas	108
Figura 22 - Produção de metano na co-DA dos substratos HH e dejetos	112

Figura 23 - Produção metano obtida na co-DA das lamas e dejetos	114
Figura 24 - Produção de metano nos processos de mono e co-DA da biomassa in-natura e dejetos	114
Figura 25 - Redução de SVT e avaliação do pH ao final do processo	119
Figura 26 - Resultado da Classificação por nível taxonômico	126
Figura 27 - Classificação geral dos resultados de filos de bactérias	127
Figura 28 - Abundância de reads (%) em nível de gênero de bactérias e arqueas nos ensaios de mono e co-DA.....	132
Figura 29 - Abundância de reads (%) em nível de gênero da microbiota do dejetos bovino e inóculo.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e tipo de biomassas.....	28
Tabela 2 - Biomassas e seus produtos/subprodutos empregadas no mercado brasileiro de energia elétrica	29
Tabela 3 - DA de biomassas lignocelulósicas pré-tratadas hidrotermicamente	48
Tabela 4 - Co-DA de diferentes biomassas lignocelulósicas e dejetos bovinos.....	55
Tabela 5 - Materiais obtidos após os ensaios de pré-tratamento hidrotérmico.....	64
Tabela 6 - Ensaios de potencial bioquímico de metano (PBM)	74
Tabela 7 - Condições de termociclagem	84
Tabela 8 - Classificação das peneiras e distribuição granulométrica	87
Tabela 9 - Fator de severidade (Log R0), severidade combinado (Log R'0) e pH das biomassas pré-tratadas	88
Tabela 10 - Composição físico-química da biomassa in-natura e das celuligninas obtidas após a etapa de pré-tratamento para determinação da porcentagem de solubilização dos macrocomponentes	91
Tabela 11 - Composição química do HH em cada condição de pré-tratamento	92
Tabela 12 - Comparação entre a solubilização de hemiceluloses e produção de xilooligossarídeos em condições similares de pré-tratamento	94
Tabela 13 - Análise de série de sólidos e pH dos substratos e inóculo utilizados nos ensaios de DA.....	96
Tabela 14 - Composição elementar (%), nitrogênio orgânico, sólidos totais e DQO dos substratos provenientes da biomassa lignocelulósica e dejetos bovinos	98
Tabela 15 - Comparação da composição elementar de diferentes biomassas lignocelulósicas in-natura, comumente utilizadas em processos de DA para produção de biometano e hidrogênio, e dejetos bovinos	99
Tabela 16 - Concentrações de micro e macronutrientes encontrados nos substratos e inóculo utilizados na DA e co-DA	101
Tabela 17 - Concentrações dos açúcares, ácidos orgânicos e aldeídos furânicos no início do processo	104
Tabela 18 - Concentrações dos AGVs no início do processo	105
Tabela 19 - Concentrações dos macrocomponentes da biomassa nos reatores	106

Tabela 20 - Valores de PBMT, PBM, digestibilidade e parâmetros cinéticos da DA	110
Tabela 21 - Valores de PBM e parâmetros cinéticos das co-Da	116
Tabela 22 - Análise de série de sólidos do digestato dos ensaios de DA e co-Da ...	118
Tabela 23 - Composição química dos digestatos obtidos nos processos de DA e co- DA.....	121
Tabela 24 - Concentrações de AGVs no digestato	122
Tabela 25 - Concentração de nutrientes presentes no digestato proveniente dos processos de DA e co-DA.....	124
Tabela 26 - Principais grupos de arqueas metanogênicas encontradas nos efluentes	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	Ácidos Graxos Voláteis
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
co-DA	Co-digestão Anaeróbia
COV	Carga Orgânica Volumétrica
DA	Digestão Anaeróbia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ENEL	Entidade Nacional de Eletricidade
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FS	Fator de Severidade
FSC	Fator de Severidade Combinado
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gt	Gigatonelada
GW	Gigawatts
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ILP	Integração Lavoura Pecuária
ILPF	Integração Lavoura Pecuária Floresta
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
LUPAM	Grupo de pesquisa: Lúpulo, Aplicações e Manejo
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MO	Matéria Orgânica
pH	Potencial Hidrogeniônico
PT	Pré-tratamento

SFT	Sólidos Fixos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
SVT	Sólidos Voláteis Totais
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
CG	Cromatografia Gasosa
Kw	Quilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1	BIOENERGIA NO BRASIL	26
2.2	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	30
2.3	CENÁRIO DO BIOGÁS NO BRASIL.....	34
2.4	POTENCIAL DAS BIOMASSAS DE SEGUNDA GERAÇÃO E DEJETOS NA DA	38
2.4.1	A CULTURA DO LÚPULO E SEUS RESÍDUOS	38
2.4.1.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CAULE DE LÚPULO E PROCESSOS DE FRACIONAMENTO PARA MELHORARIA DA DA.....	45
2.5	PRODUÇÃO DE DEJETOS E POTENCIAL NA DA.....	50
2.6	CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS E DEJETOS BOVINOS	53
2.7	SUBPRODUTO DA DA: DIGESTATO	57
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	59
3.1	MATERIAIS.....	59
3.1.1	COLHEITA E PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PODA DE LÚPULO..	59
3.1.2	ANÁLISE DE GRANULOMETRIA DO CAULE DE LÚPULO MOÍDO	60
3.1.3	OBTENÇÃO E PREPARO DO DEJETO.....	60
3.1.4	OBTENÇÃO E PREPARO DO INÓCULO	61
3.2	PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO DO CAULE DE LÚPULO	62
3.3	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS E INÓCULO.....	64
3.3.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CAULE DE LÚPULO IN-NATURA, DA FRAÇÃO SÓLIDA E DA LAMA	65
3.3.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO HIDROLISADO HEMICELULÓSICO.	65
3.3.3	ANÁLISE DA SÉRIE DE SÓLIDOS	67
3.3.4	DETERMINAÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO) E POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO TEÓRICO (PBMT) DOS HH	68
3.3.5	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO TEÓRICO (PBMT) DAS FRAÇÕES SÓLIDAS	71
3.3.6	ANÁLISE DE MACRO E MICRONUTRIENTES DOS SUBSTRATOS E INÓCULO	72
3.4	BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	73
3.4.1	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE DA	75
3.4.2	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO.....	76
3.4.3	MODELAGEM CINÉTICA DA DA.....	78
3.5	ANÁLISES DOS DIGESTATOS	80
3.5.1	POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)	80
3.5.2	ANÁLISE DA SÉRIE DE SÓLIDOS	81
3.5.3	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO).....	81
3.5.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	81
3.5.5	ANÁLISE DE MICRO E MACRONUTRIENTES	82
3.5.6	ANÁLISE DE METAGENÔMICA	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1	PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO DO CAULE DO LÚPULO.....	87

4.2	COMPOSIÇÃO DOS SUBSTRATOS E INÓCULOS PARA OS ENSAIOS DE DA E CO-DA	95
4.2.1	ANÁLISE DA SÉRIE DE SÓLIDOS E PH	95
4.2.2	ANÁLISE DE DQO E COMPOSIÇÃO ELEMENTAR	97
4.2.3	ANÁLISE DE MACRO E MICRONUTRIENTES DOS SUBSTRATOS E INÓCULO.....	99
4.3	AVALIAÇÃO DA DIGESTÃO (DA) E CO-DIGESTÃO (CO-DA) ANAERÓBICA.....	103
4.3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA INICIAL DOS REATORES.....	103
4.3.2	POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO EM DA	106
4.3.3	POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO EM CO-DA.....	112
4.4	ANÁLISES DO DIGESTATO	117
4.4.1	ANÁLISE DE SÉRIE DE SÓLIDOS E AVALIAÇÃO DO PH FINAL.....	117
4.4.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	120
4.4.3	ANÁLISE DE MICRO E MACRONUTRIENTES.....	123
4.5	ANÁLISE DE METAGÊNOMICA.....	126
5	CONCLUSÃO.....	135
	REFERÊNCIAS	139
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	159
	APÊNDICE B – MASSA DE ENTRADA DE CADA FRAÇÃO 2:1 SVT (SUBSTRATO:INÓCULO)	167

1 INTRODUÇÃO

A energia cumpre um papel indispensável na economia de um país, fornecendo suporte para diversos setores e serviços de suma importância. Em escala global, os combustíveis fósseis predominam na oferta de energias primárias mas, em muitos países, a energia renovável já representa uma parcela relevante deste setor (Nogueira; Capaz; Lora, 2021). Segundos dados do relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), em 2022, a participação das energias renováveis na matriz energética mundial representava apenas 14%, enquanto para o Brasil tal energia já corresponde à 47,4%, valor este representativo e muito associado ao uso das bioenergias.

A bioenergia é uma forma de energia renovável produzida a partir de uma biomassa, que pode ser de origem vegetal e animal. Tal energia pode ser utilizada para gerar calor, eletricidade ou mesmo combustível para motores de combustão em geral. Este tipo de energia renovável e de baixo carbono, promove o sequestro do gás carbônico atmosférico, além de oferecer inúmeros benefícios ambientais e socioeconômicos, apoiado nas metas globais de mudança climática dentro da Agenda 2023 da ONU (IPEA, 2018; Röder; Welfle, 2019).

No Brasil, a bioenergia é fortemente representada pelo uso da cana-de-açúcar, que equivale à 15,4% da matriz energética renovável do país. Além disso, o carvão e a lenha vegetal (9,0%), e a lixívia (7,0%) - subproduto do setor de celulose -, são outras fontes relevantes de bioenergia para o país (EPE, 2023). Visando aumentar e melhorar ainda mais este índice de renovabilidade da matriz energética brasileira, muitos estudos vêm sendo realizados visando explorar novas biomassas e desenvolver tecnologias de segunda geração (2G) para produção de bioenergia (Chandel *et al.*, 2021; Dias *et al.*, 2011; Lorenzi; Andrade, 2019).

As bioenergias 2G são produzidas a partir de culturas não alimentares, produzidas diretamente para este fim, ou a partir de resíduos agrícolas de culturas alimentares ou de resíduos do setor florestal. Uma das principais vantagens em utilizar subprodutos do setor agroindustrial na produção de bioenergia 2G é que não há consumo de fertilizante adicional, água ou terra para cultivar tal matéria-prima, melhorando ainda mais a pegada de carbono destes processos (Dahman *et al.*, 2019).

Muitos setores agroindustriais utilizam parte destas biomassas lignocelulósicas, como palhas, bagaços, cascas, para produzir bioenergia a partir da sua queima direta em caldeiras, no processo chamado de cogeração. Entretanto, ainda há uma quantidade substancial de biomassa que pode ser usada para a produção de novos biocombustíveis (Menandro *et al.*, 2017).

Além das biomassas lignocelulósicas, as biomassas residuais de origem animal também podem promover a geração de bioenergia, com destaque para dejetos de animais, que apresentam um grande caráter poluidor, necessitando de tratamento para um manejo adequado (Abbas *et al.*, 2023).

O agronegócio brasileiro se intensifica a cada ano e ganha destaque no mercado mundial, sendo importante fonte de criação de riqueza para a economia do país. No Brasil, a bovinocultura apresenta o segundo maior rebanho do mundo, e ganha destaque como o maior exportador de carne bovina (Galvão, 2017). Sendo assim, a ampliação e intensificação das atividades pecuárias resultam em novas exigências para o descarte seguro de grandes quantidades de dejetos que são gerados na produção desse setor (Capitani; Farina, 2022)

Diante desse cenário de demanda energética, uso da terra e mudanças climáticas, surgem diversas alternativas tecnológicas para o tratamento destes resíduos do setor agroindustrial e agropecuário para geração de energia. Dentre essas alternativas, a que desperta grande interesse devido sua facilidade de implementação e viabilidade técnico-econômica é a digestão anaeróbica (DA) (Vu *et al.*, 2020).

O processo de DA, também chamado de biodigestão, é um tratamento biológico que permite a decomposição e estabilização de diversos resíduos, como os lignocelulósicos e dejetos de animais, enquanto produz simultaneamente bioenergia (biogás), nutrientes que podem ser utilizados para correções de solo (biofertilizante), além de compensar a emissão de gases de efeito estufa (Wagner *et al.*, 2018).

Em 2022, o biogás representou apenas 2,1% da matriz energética brasileira (EPE, 2023). Entretanto, muitos dos entraves políticos referentes à produção e a distribuição desse biocombustível vêm se modificando ao longo dos últimos anos, mediante uma estratégia federal de incentivo ao uso sustentável de biogás e

biometano. O objetivo destas estratégias é fomentar programas e ações para reduzir as emissões de metano e incentivar o uso de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível (BRASIL, 2022).

Neste mercado, a cadeia produtiva lavoura-pecuária pode contribuir para a produção desta bioenergia, favorecendo uma destinação correta e segura destes resíduos, minimizando as emissões de gases de efeito estufa (Capitani; Farina, 2022). Sendo assim, a geração de biogás a partir de dejetos e resíduos agroindustriais pode ser aderida a um plano de desenvolvimento sustentável do agronegócio, proporcionando soluções sistêmicas que contemplem energia, alimento e meio ambiente (Galvão, 2017).

Dentre as biomassas lignocelulósicas de baixo uso podemos destacar o resíduo de poda da cultura do lúpulo (*Humulus Lupulus L.*), composto por caules e folhas, que representa aproximadamente 75% da biomassa produzida no cultivo. Este resíduo é normalmente queimado ou utilizados em compostagem após a colheita dos cones, visto que não apresenta valor comercial e possui baixa efetividade de recobrimento de solo, trazendo problemas ambientais devido à baixa biodegradabilidade (Kanai *et al.*, 2021). Sendo assim, além do seu uso na produção de mudas, por meio de estacas herbáceas (pedaços do caule), o resíduo pode ser destinado no processo de DA, trazendo benefícios a cadeia mediante a produção de bioenergia, já que a cultura exige alta taxa de incidência de luz, natural e artificial (Agehara, 2020).

Atualmente o Brasil possui 50 cultivares no Registro Nacional de Cultivares, sendo que todas livres de patentes (RNC, 2023). Apesar das dificuldades naturais de um novo cultivo se estabelecendo, em 2018 foi fundada a Associação Brasileira dos Produtores de Lúpulo (APROLÚPULO), que conta atualmente com mais de 170 associados, presentes em quatorze Estados e o Distrito Federal. Segundo dados da Aprodúpulo (APROLÚPULO, 2022), o Brasil atualmente possui cerca de 50 hectares de lúpulo, com produção estimada em 20 toneladas. Já os dejetos bovinos representam uma expressiva biomassa no país, tornando cada dia mais preocupante o manejo deste resíduo. O Brasil produziu em 2021 mais de 224,6 milhões de cabeças de gado, reportando sucessivos crescimentos ao longo dos anos (IBGE, 2021a).

Sendo assim, a junção dos resíduos da cultura do lúpulo com os dejetos bovinos pode promover uma integração da cadeia lavoura-pecuária, proporcionando um manejo adequado dos resíduos na geração de bioenergia e biofertilizantes, por meio dos processos de co-digestão anaeróbica (co-DA). A cultura do lúpulo está em expansão no país e vale destacar que os resíduos lignocelulósicos gerados ainda não foram explorados em estudos científicos. Além disso, regiões onde cultivares de lúpulo vêm ganhando destaque, como Santa Catarina e Minas Gerais, os plantios estão localizados próximos à produção animal, como suinocultura e bovinocultura, respectivamente, sendo muitas vezes lotados em uma mesma propriedade. Assim, o manejo integrado pode favorecer a sustentabilidade no setor.

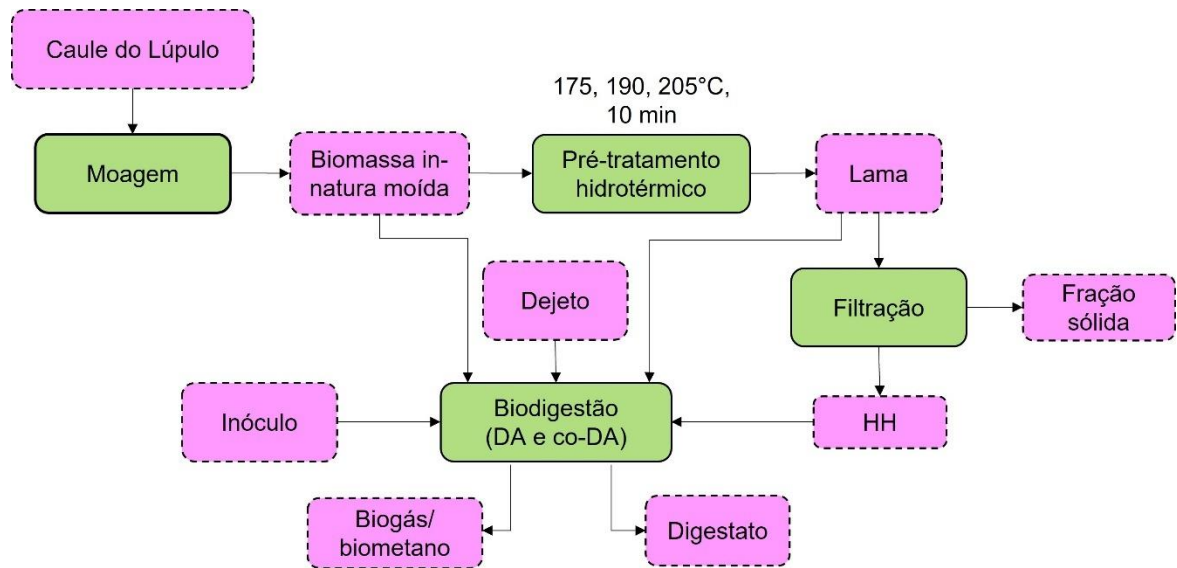
Neste sentido, visando contribuir com estudos no âmbito de manejo de resíduos e produção de energia renovável, este projeto tem por objetivo avaliar o potencial metanogênico, em estudos de mono e co-digestão, utilizando dejetos bovinos e caule de lúpulo pré-tratados em meios aquosos. Foi avaliado como o caule de lúpulo pré-tratado pode contribuir com o processo de DA dos dejetos bovinos, utilizando tanto a fração líquida do pré-tratamento quanto a lama (mistura da fração sólida + líquida). Foi avaliado também como a etapa de pré-tratamento e as condições operacionais deste processo influenciam na produção do biogás e biometano, entre os processos de DA e co-DA. Para isso, alguns objetivos específicos foram delineados:

- Avaliar o efeito das condições operacionais do pré-tratamento hidrotérmico do caule de lúpulo em relação ao fracionamento da biomassa;
- Avaliar o potencial bioquímico de metano (PBM) da biomassa in-natura, das frações obtidas nos ensaios de pré-tratamento (lama e hidrolisado hemicelulósico), e do dejetos bovino, assim como a co-DA entre os substratos pré-tratados e o dejetos;
- Realizar um ajuste de modelo cinético e obter parâmetros cinéticos;
- Caracterizar quimicamente e biologicamente os digestatos obtidos a fim de verificar as mudanças biológicas no sistema e composição do mesmo para potencial aplicação em fertirrigação.

A Figura 1 ilustra o fluxograma de atividades conduzido ao longo da pesquisa, representando os substratos e delineando suas frações após passarem pelo pré-

tratamento hidrotérmico. Além disso, demonstra a utilização desses substratos nos processos de DA e co-DA, assim como seus produtos finais, biogás/biometano e digestato.

Figura 1 - Fluxograma das atividades executadas no projeto



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÃO

A caracterização do caule de lúpulo, incluindo as frações obtidas após o pré-tratamento, revelou-se fundamental para a compreensão do desempenho do pré-tratamento hidrotérmico e sua influência na modificação da estrutura da biomassa lignocelulósica. Ao explorar as propriedades do caule de lúpulo, foi possível identificar como o pré-tratamento hidrotérmico afetou os componentes da biomassa, evidenciando mudanças, especialmente a baixa liberação de hemiceluloses. Essas alterações estruturais têm implicações significativas nos processos subsequentes de conversão da biomassa em produtos de interesse, como o biocombustível em questão.

Adicionalmente, a análise detalhada da caracterização do caule de lúpulo possibilitou estabelecer correlações entre a composição do material e seu desempenho durante o pré-tratamento. Esse entendimento é fundamental para aprimorar as condições de processamento, com o intuito de maximizar a eficácia na obtenção de produtos derivados dessa biomassa, e também para explorar possibilidades adicionais de utilização, manejo e aproveitamento dos resíduos de poda para os produtores dessa cultura.

A eficiência do pré-tratamento na DA foi demonstrada frente ao uso da biomassa in-natura, além do efeito positivo da co-DA na produção de biometano. No caso da fração líquida (HH), nos processos de mono-DA, a condição de pré-tratamento a 175°C apresentou resultados menos significativos quando comparado à biomassa in-natura, com um aumento de produção de 27,05%. Por outro lado, os HH obtidos à 190 e 205°C demonstraram uma produção acumulada de biometano 53,36 e 57,27% superior, respectivamente, a da biomassa in-natura. Já a lama pré-tratada, em processo de mono-DA, demonstrou uma produção superior de biometano quando comparada a biomassa in-natura e ao HH, nas mesmas condições operacionais. A lama, na condição mais severa de pré-tratamento (175°C, 10 min), obteve produção de biometano 293,53% maior do que a biomassa in-natura.

O processo co-DA se demonstrou eficaz, observando que, ao empregar a biomassa in-natura com os dejetos bovinos, obteve-se uma produção acumulada de $488,63 \pm 20,08$ NmL CH₄/g SVT, representando um aumento de 392,32% em relação à produção obtida na mono-DA do substrato in-natura. No entanto, ao comparar esse

resultado com a mono-DA dos dejetos bovinos, que registrou uma produção de $793,27 \pm 13,68$ NmL CH₄/g SVT, foi observado que o processo com dejetos proporcionou um acréscimo de 61,59% no biometano produzido. Já na co-DA utilizando a lama na condição mais severa de processo (205°C), foi observado uma produção de $1078,22 \pm 13,20$ NmL CH₄/g SVT, promovendo um aumento de 73,57% na produção de biometano em comparação com a mono-DA do dejetos bovino e um aumento de 75,87% em relação à mono-DA da lama.

Assim, a combinação entre o pré-tratamento hidrotérmico da biomassa de lúpulo e o dejetos bovino, por meio do processo de co-DA, demonstrou ser uma abordagem promissora para aumentar a produção de metano. Essa observação destaca a importância de comparar a produção de biometano entre os sistemas de DA e co-DA, considerando as diferentes temperaturas de pré-tratamento, o que pode ser significativo ao implementar a co-DA e o pré-tratamento hidrotérmico em um contexto real no setor agropecuário.

A caracterização e composição do digestato evidenciou seu potencial como biofertilizante, apresentando nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas e propriedades benéficas para a saúde do solo, em especial concentrações significativas de NPK, corroborando com a sustentabilidade na gestão de resíduos agrícolas e pecuários e maior valor agregado.

A análise metagenômica no estudo permitiu uma compreensão mais aprofundada da microbiota presente no efluente. A comunidade microbiana incluindo arqueas e demais bactérias variou conforme foram expostas às diferentes condições de pré-tratamento, entretanto, foi observada a presença de microrganismos e bactérias essenciais para o desenvolvimento das diferentes etapas dos processos anaeróbios.

Assim, a valorização do resíduo lignocelulósico do caule de lúpulo destaca-se como uma alternativa promissora, contribuindo para a busca contínua por soluções inovadoras e sustentáveis no campo da gestão de resíduos e na produção de energia renovável. Além disso, a utilização do dejetos bovino na DA proporciona uma destinação eficiente desta biomassa de alto potencial poluidor e pouco explorada.

A pesquisa proporcionou uma contribuição significativa para o avanço do conhecimento na área de produção de biogás utilizando resíduos da cultura do lúpulo,

explorando a integração da cadeia lavoura-pecuária através de estudos de DA e co-DA de resíduos da cultura de lúpulo com dejetos bovinos. Destaca-se a significativa contribuição para o campo de DA, ao explorar a efetividade do resíduo lignocelulósico proveniente do caule de lúpulo. A ausência de estudos prévios sobre o uso do caule de lúpulo em processos de DA realça a singularidade e a relevância desta pesquisa, ampliando o entendimento sobre a diversidade de substratos para DA, e oferece uma perspectiva promissora para a valorização de resíduos lignocelulósicos até então pouco explorados.

A constatação do efeito positivo do pré-tratamento hidrotérmico na biodegradabilidade do caule de lúpulo não apenas amplia o escopo de aplicação desse material, mas também sinaliza caminhos para a otimização de processos de DA, tornando-os mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Y. et al. Co-digestion of cow manure and food waste for biogas enhancement and nutrients revival in bio-circular economy. **Chemosphere**, v. 311, p. 137018, 1 jan. 2023.
- ABDULLAHI, Y. A. et al. Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8631–8636, 1 dez. 2008.
- ABID, M. et al. Novel insights of impacts of solid content on high solid anaerobic digestion of cow manure: Kinetics and microbial community dynamics . **Bioresource Technology**, v. 333, p. 125205, 1 ago. 2021.
- ABOUDI, K.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C. J.; ROMERO-GARCÍA, L. I. Evaluation of methane generation and process stability from anaerobic co-digestion of sugar beet by-product and cow manure. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 121, n. 5, p. 566–572, 1 maio 2016.
- ABRAM, ONIKA et al. A comparison of antioxidant and antimicrobial activity between hop leaves and hop cones - ScienceDirect. fev. 2015.
- ADGHIM, M. et al. Assessment of the biochemical methane potential of mono- and co-digested dairy farm wastes. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 1, p. 88–99, 1 jan. 2020.
- ADUBA, C. C. et al. Integrated Valorization of Cassava Wastes for Production of Bioelectricity, Biogas and Biofertilizer. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, n. 12, p. 4003–4019, 1 dez. 2023.
- AGEHARA, S. Using Supplemental Lighting to Control Flowering of Hops in Florida. IFAS Extension HS1365. v. 2, 2020.
- AGRAWAL, A.; CHAUDHARI, P. K.; GHOSH, P. Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: a critical review of associated challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 10, p. 24987–25012, 1 fev. 2023.
- AHMED, B. et al. Improvement of Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass by Hydrothermal Pretreatment. **Applied Sciences**, v. 9, n. 18, p. 3853, 13 set. 2019.
- AKHIAR, D. PERANCANGAN APLIKASI SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PADA DISTRIBUSI AYAM POTONG PT. NUJ / MTS DENGAN MENGGUNAKAN METODE DISTRIBUTOR REQUIRMENT PLANNING (DRP). **Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri**, v. 16, n. 2, p. 118–132, 15 dez. 2016.
- ALONSO-ESTEBAN, J. I. et al. Phenolic composition and antioxidant, antimicrobial and cytotoxic properties of hop (*Humulus lupulus* L.) Seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 134, p. 154–159, 1 ago. 2019.

- AL-SULAIMI, I. N. et al. Effect of Volatile Fatty Acids Accumulation on Biogas Production by Sludge-Feeding Thermophilic Anaerobic Digester and Predicting Process Parameters. **Fermentation**, v. 8, n. 4, p. 184, abr. 2022.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, D.C.APHA-AWWA-WEF, , 2005a.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. [s.l.] American Public Health Association, 2005b.
- APROLÚPULO. **Associação Brasileira de Produtores de Lúpulo - Estatísticas**. Disponível em: <<https://aprolupulo.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 6 mar. 2023.
- APUL, O. G.; SANIN, F. D. Ultrasonic pretreatment and subsequent anaerobic digestion under different operational conditions. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 23, p. 8984–8992, 1 dez. 2010.
- AQUINO, A. M. DE et al. **Produção de lúpulo na Região Serrana Fluminense: manual de boas práticas**. [s.l.] Nova Friburgo: Associação Comercial, Industrial e Agrícola de Nova Friburgo - ACIANF, 2022., 2022.
- AQUINO, S. F. et al. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 192–201, 2007.
- AROMOLARAN, A.; SARTAJ, M.; ALQARALLEH, R. M. Z. Biogas production from sewage scum through anaerobic co-digestion: the effect of organic fraction of municipal solid waste and landfill leachate blend addition. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 17, p. 16049–16065, 1 nov. 2023.
- ATELGE, M. R. et al. A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. **Fuel**, v. 270, p. 117494, 2020.
- AVACI, A. B. et al. Avaliação econômico-financeira da microgeração de energia elétrica proveniente de biogás da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 456–462, abr. 2013.
- AWAIS, M. et al. Methane Production and Kinetic Modeling for Co-digestion of Manure with Lignocellulosic Residues. **Energy & Fuels**, v. 30, n. 12, p. 10516–10523, 15 dez. 2016.
- BAH, H. et al. Evaluation of batch anaerobic co-digestion of palm pressed fiber and cattle manure under mesophilic conditions. **Waste Management**, v. 34, n. 11, p. 1984–1991, 1 nov. 2014.
- BALASUNDARAM, G. et al. Recalcitrant compounds formation, their toxicity, and mitigation: Key issues in biomass pretreatment and anaerobic digestion. **Chemosphere**, v. 291, p. 132930, 1 mar. 2022.
- BARTMANSKA, A. et al. Biotransformations of prenylated hop flavonoids for drug discovery and production. **Current drug metabolism**, v. 14, n. 10, p. 1083–1097, 24 dez. 2013.

BATISTA, G. et al. Effect of severity factor on the hydrothermal pretreatment of sugarcane straw. **Bioresource Technology**, v. 275, p. 321–327, 1 mar. 2019.

BAUERLE, W. L. Disentangling photoperiod from hop vernalization and dormancy for global production and speed breeding. **Scientific Reports**, p. 16003, 5 nov. 2019.

BEDINI, S. et al. Not just for beer: Evaluation of spent hops (*Humulus lupulus* L.) as a source of eco-friendly repellents for insect pests of stored foods. **Journal of Pest Science**, v. 88, n. 3, p. 583–592, 20 set. 2015.

BEDOÍĆ, R. et al. Green biomass to biogas – A study on anaerobic digestion of residue grass. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 700–709, 10 mar. 2019.

BIOGASMAP. **CI Biogas Energias Renováveis**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiODc2NTlhOGltOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRIYjFiOWQ3liwidCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>>. Acesso em: 21 dez. 2022.

BOCQUET, L. et al. Phenolic Compounds from *Humulus lupulus* as Natural Antimicrobial Products: New Weapons in the Fight against Methicillin Resistant *Staphylococcus aureus*, *Leishmania mexicana* and *Trypanosoma brucei* Strains. **Molecules**, v. 24, n. 6, p. 1024, 14 mar. 2019.

BOHUTSKYI, P. et al. Co-digestion of Wastewater-Grown Filamentous Algae With Sewage Sludge Improves Biomethane Production and Energy Balance Compared to Thermal, Chemical, or Thermochemical Pretreatments. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, 2019.

BRENELLI, L. B. et al. An integrated approach to obtain xylo-oligosaccharides from sugarcane straw: From lab to pilot scale. **Bioresource Technology**, v. 313, n. March, p. 123637, 2020a.

BRENELLI, L. B. et al. An integrated approach to obtain xylo-oligosaccharides from sugarcane straw: From lab to pilot scale. **Bioresource Technology**, v. 313, n. 123637, 1 out. 2020b.

BUENDÍA, I. M. et al. Feasibility of anaerobic co-digestion as a treatment option of meat industry wastes. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 6, p. 1903–1909, 1 mar. 2009.

BUFFIERE, P. et al. Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties. **Water Science and Technology**, v. 53, n. 8, p. 233–241, 1 abr. 2006.

BÜHRING, G. M. B.; SILVEIRA, V. S. P. Biogas originated from residual biomass in ecosystem services. **SciELO - Brasil**, p. 13, 2018.

BITRÓN, G. et al. Biochemical methane potential from lignocellulosic wastes hydrothermally pretreated. **Industrial Crops and Products**, v. 139, p. 111555, 1 nov. 2019.

BUSTAMANTE, M. A. et al. Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. **Journal of Cleaner Production**, Cleaner Production: initiatives and challenges for a sustainable world. v. 47, p. 61–69, 1 maio 2013.

BUȚU, A.; RODINO, S.; BUȚU, M. THE ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF HUMULUS LUPULUS L. DEPENDING ON STORAGE CONDITIONS. v. 62, 2016.

CAMPANARO, S. et al. Metagenomic analysis and functional characterization of the biogas microbiome using high throughput shotgun sequencing and a novel binning strategy. **Biotechnology for Biofuels**, v. 9, n. 1, p. 26, 2 fev. 2016.

CAPITANI, D. H. D.; FARINA, J. V. Viabilidade energética e econômica da produção de biogás a partir de dejetos bovinos em um sistema de integração lavoura-pecuária | REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade. 21 out. 2022.

CAPSON-TOJO, G. et al. Addition of granular activated carbon and trace elements to favor volatile fatty acid consumption during anaerobic digestion of food waste. **Bioresource Technology**, v. 260, p. 157–168, 1 jul. 2018.

CÁRDENAS-CLEVES, L. M. et al. Perspectives of Biochemical Methane Potential - BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes. **Revista ION**, v. 29, n. 1, p. 95–108, jun. 2016.

CHEN, J. L. et al. Toxicants inhibiting anaerobic digestion: A review. **Biotechnology Advances**, v. 32, n. 8, p. 1523–1534, 2014.

CHENG, D. L. et al. Problematic effects of antibiotics on anaerobic treatment of swine wastewater. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 642–653, 1 set. 2018.

CHO, S.-K. et al. Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 210–217, 1 mar. 2013.

CHUM, H. L.; JOHNSON, D. K.; BLACK, S. K. Organosolv pretreatment for enzymic hydrolysis of poplars. 2. Catalyst effects and the combined severity parameter. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 29, n. 2, p. 156–162, fev. 1990.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (EDS.). **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

COSTA, K. C.; LEIGH, J. A. Metabolic versatility in methanogens. **Current Opinion in Biotechnology**, Cell and Pathway Engineering. v. 29, p. 70–75, 1 out. 2014.

CRUZ, I. A. et al. Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: An updated and comprehensive review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100196, 1 out. 2021.

CZEKAŁA, W. Solid Fraction of Digestate from Biogas Plant as a Material for Pellets Production. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 5034, jan. 2021.

CZEKAŁA, W. et al. Biogas Plant Operation: Digestate as the Valuable Product. **Energies**, v. 15, n. 21, p. 8275, jan. 2022.

DAS, N. et al. A comprehensive review of characterization, pretreatment and its applications on different lignocellulosic biomass for bioethanol production. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 2, p. 1503–1527, 1 jan. 2023.

DAWANA KECHE, D. et al. Anaerobic digestion of urea pretreated water hyacinth removed from Lake Abaya; bio-methane potential, system stability, and substance conversion. **RSC Advances**, v. 12, n. 14, p. 8548–8558, 2022.

DRIDI, B. et al. Methanomassiliicoccus luminyensis gen. nov., sp. nov., a methanogenic archaeon isolated from human faeces. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 62, n. Pt_8, p. 1902–1907, 2012.

ELALAMI, D. et al. Mild microwaves, ultrasonic and alkaline pretreatments for improving methane production: Impact on biochemical and structural properties of olive pomace. **Bioresource Technology**, v. 299, p. 122591, 1 mar. 2020.

EPE. Relatório Síntese 2022 - Ano Base 2021. 2022.

FAGHERAZZI, M. M. et al. A cultura do lúpulo: botânica e variedades. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 1, n. 1, 2017.

FEIJOO, G. et al. Sodium inhibition in the anaerobic digestion process: Antagonism and adaptation phenomena. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 17, n. 2, p. 180–188, 1 fev. 1995.

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

FERRY, J. G. How to Make a Living by Exhaling Methane. **Annual Review of Microbiology**, v. 64, n. 1, p. 453–473, 2010a.

FERRY, J. G. The chemical biology of methanogenesis. **Planetary and Space Science**, v. 58, n. 14, p. 1775–1783, 1 dez. 2010b.

FERRY, J. G. Fundamentals of methanogenic pathways that are key to the biomethanation of complex biomass. **Current Opinion in Biotechnology**, Energy biotechnology – Environmental biotechnology. v. 22, n. 3, p. 351–357, 1 jun. 2011.

FRANCO, W. M.; BEZERRA, M. F. C. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. dez. 2018.

FRANKE-WHITTLE, I. H. et al. Changes in the microbial communities during co-composting of digestates. **Waste Management**, v. 34, n. 3, p. 632–641, 1 mar. 2014a.

FRANKE-WHITTLE, I. H. et al. Investigation into the effect of high concentrations of volatile fatty acids in anaerobic digestion on methanogenic communities. **Waste Management**, v. 34, n. 11, p. 2080–2089, 1 nov. 2014b.

FRIGO, E. P. et al. BIOMASSA RESIDUAL RURAL PROVENIENTE DE DIFERENTES ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS BRASILEIRAS. v. 30, p. 7, 2015.

GABALLAH, E. S. et al. Enhancement of biogas production from rape straw using different co-pretreatment techniques and anaerobic co-digestion with cattle manure. **Bioresource Technology**, v. 309, p. 123311, 1 ago. 2020.

GALVÃO, R. R. DE A. **Boletim de conjuntura do setor energético**. [s.l.] FGV ENERGIA, mar. 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/boletim_conjuntura-marco-2017_v3_rev1_0.pdf>.

GARCIA, J.-L.; PATEL, B. K. C.; OLLIVIER, B. Taxonomic, Phylogenetic, and Ecological Diversity of Methanogenic Archaea. **Anaerobe**, v. 6, n. 4, p. 205–226, 1 ago. 2000.

GERARDI, M. H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. first ed. ed. Linden, Pennsylvania: John Wiley & Sons, 2003.

GETABALEW, M.; ALEMNEH, T.; BZUNEH, E. Review on Methanogenesis and its Role. v. 6, p. 7, 2020.

GOEL, R.; TOKUTOMI, T.; YASUI, H. Anaerobic digestion of excess activated sludge with ozone pretreatment. **Water Science and Technology**, v. 47, n. 12, p. 207–214, 1 jun. 2003.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, v. 32, p. 582–587, 2009.

GONG, L. et al. Impact of hydrothermal pre-treatment on the anaerobic digestion of different solid–liquid ratio sludges and kinetic analysis. **RSC Advances**, v. 9, n. 33, p. 19104–19113, 14 jun. 2019.

GUERINO FILHO, M. et al. Biomass availability assessment for biogas or methane production in Rio Grande do Sul, Brazil | SpringerLink. p. 1353–1366, jun. 2019.

HAGOS, K. et al. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1485–1496, 1 set. 2017.

HASHEMI, B. et al. Yield improvements in anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks - ScienceDirect. v. 288, mar. 2021.

HASHEMI, S. S.; KARIMI, K.; MIRMOHAMADSADEGHI, S. Hydrothermal pretreatment of safflower straw to enhance biogas production. **Energy**, v. 172, p. 545–554, 1 abr. 2019.

HEDDERICH, R.; WHITMAN, W. B. Physiology and Biochemistry of the Methane-Producing Archaea. Em: DWORKIN, M. et al. (Eds.). **The Prokaryotes: Volume 2: Ecophysiology and Biochemistry**. New York, NY: Springer, 2006. p. 1050–1079.

HIMANSHU, H. et al. Synergies from co-digesting grass or clover silages with cattle slurry in in vitro batch anaerobic digestion. **Renewable Energy**, v. 127, p. 474–480, 1 nov. 2018.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, OECD Workshop: Livestock Waste Treatment Systems of the Future: A Challenge to Environmental Quality, Food Safety, and Sustainability. v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 1 nov. 2009.

HOWELL, G.; BENNETT, C.; MATERIĆ, D. A comparison of methods for early prediction of anaerobic biogas potential on biologically treated municipal solid waste. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 887–894, 15 fev. 2019.

HU, Y.; WANG, F.; CHI, Y. The Evolution of Microbial Community during Acclimation for High Sodium Food Waste Anaerobic digestion. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 11, p. 6057–6063, 1 nov. 2020.

IBGE. **Produção da Pecuária Municipal**. [s.l.] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021a. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=784>>. Acesso em: 12 jan. 2023.

IBGE. **Produção Agropecuária em Minas Gerais**. Estatístico e Informativo. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mg>>. Acesso em: 10 jul. 2023b.

ILLUMINA. **16S metagenomic sequencing library preparation: preparing 16S ribosomal RNA gene amplicons for the Illumina MiSeq system**. San Diego, CA - EUA: Illumina Technical Document, 2013. Disponível em: <https://support.illumina.com/documents/documentation/chemistry_documentation/16s/16s-metagenomic-library-prep-guide-15044223-b.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2023.

IPEA. **Agenda 2030| ODS - Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [s.l.] Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8855/1/Agenda_2030_ods_metas_na_c_dos_obj_de_desenv_susten_propos_de_adequa.pdf>.

ISIKGOR, F. H.; BECER, C. R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. **Polymer Chemistry**, v. 6, n. 25, p. 4497–4559, 16 jun. 2015.

IWASAKI, M. et al. Quantity changes in *Pseudomonas* species in dairy manure during anaerobic digestion at mesophilic and thermophilic temperatures. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 3, p. 423–432, 1 maio 2019.

JASTROMBEK, J. M. et al. Hop: An Emerging Crop in Subtropical Areas in Brazil. **Horticulturae** 2022, Vol. 8, Page 393, v. 8, n. 5, p. 393, 30 abr. 2022.

JIMÉNEZ, J. et al. Microbial community dynamics reflect reactor stability during the anaerobic digestion of a very high strength and sulfate-rich vinasse. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 93, n. 4, p. 975–984, 2018.

JOSEPH, G. et al. Two-stage thermophilic anaerobic co-digestion of corn stover and cattle manure to enhance biomethane production. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 54, n. 5, p. 452–460, 16 abr. 2019.

KANAI, N. et al. Upcycling of Waste Hop Stems into Cellulose Nanofibers: Isolation and Structural Characterization. **ACS Agricultural Science & Technology**, p. acsagscitech.1c00041, 11 jun. 2021a.

KANAI, N. et al. Upcycling of Waste Hop Stems into Cellulose Nanofibers: Isolation and Structural Characterization. **ACS Agricultural Science & Technology**, v. 1, n. 4, p. 347–354, 16 ago. 2021b.

KARIMI, K.; TAHERZADEH, M. J. A critical review on analysis in pretreatment of lignocelluloses: Degree of polymerization, adsorption/desorption, and accessibility. **Bioresource Technology**, v. 203, p. 348–356, 1 mar. 2016.

KASINATH, A. et al. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111509, 1 out. 2021.

KATO, S.; HASHIMOTO, K.; WATANABE, K. Methanogenesis facilitated by electric syntrophy via (semi)conductive iron-oxide minerals. **Environmental Microbiology**, v. 14, n. 7, p. 1646–1654, 2012.

KHAN, S. et al. Challenges and perspectives on innovative technologies for biofuel production and sustainable environmental management. **Fuel**, v. 325, p. 124845, 1 out. 2022.

KIM, M. J.; KIM, S. H. Minimization of diauxic growth lag-phase for high-efficiency biogas production. **Journal of Environmental Management**, v. 187, p. 456–463, 1 fev. 2017.

KIM, S.; LEE, C.; YOUNG KIM, J. Effects of alkaline thermal hydrolysis on the formation of refractory compounds and energy balance of anaerobic digestion of cattle manure. **Applied Energy**, v. 342, p. 121097, 15 jul. 2023.

KLEEREBEZEM, R. Biochemical Conversion. Em: **Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future**. Department of Biotechnology, Environmental Biotechnology Group, Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. p. 441–468.

KORPELAINEN, H.; PIETILÄINEN, M. Hop (*Humulus lupulus* L.): Traditional and Present Use, and Future Potential. **Economic Botany**, v. 75, n. 3, p. 302–322, 1 dez. 2021.

KOSTER, I. W. et al. Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH-levels. **Water Research**, v. 20, n. 12, p. 1561–1567, 1 dez. 1986.

KOTHARI, R. et al. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174–195, 1 nov. 2014.

KOVAČIĆ, Đ. et al. xu. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 184, n. 2, p. 471–483, 1 fev. 2018.

KURADE, M. B. et al. Acetoclastic methanogenesis led by Methanosarcina in anaerobic co-digestion of fats, oil and grease for enhanced production of methane. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 351–359, 1 jan. 2019.

LANSING, S. et al. Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. **Biomass and Bioenergy**, Current and Potential Capabilities of Wood Production Systems in the Southeastern U.S. v. 34, n. 12, p. 1711–1720, 1 dez. 2010.

LEE, J.; PARK, K. Y. Impact of hydrothermal pretreatment on anaerobic digestion efficiency for lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperature on the formation of biomass-degrading byproducts. **Chemosphere**, v. 256, p. 127116, 1 out. 2020.

LEE, J.; YOUNG PARK, K. Impact of hydrothermal pretreatment on anaerobic digestion efficiency for lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperature on the formation of biomass-degrading byproducts. **Chemosphere**, v. 256, p. 127116, 1 out. 2020.

LEE, S.-H. et al. Distribution and abundance of Spirochaetes in full-scale anaerobic digesters. **Bioresource Technology**, Special Issue: IBS 2012 & Special Issue: IFIBiop. v. 145, p. 25–32, 1 out. 2013.

LEE, S.-H. et al. Evidence of syntrophic acetate oxidation by Spirochaetes during anaerobic methane production. **Bioresource Technology**, v. 190, p. 543–549, 1 ago. 2015.

LI, A. et al. A pyrosequencing-based metagenomic study of methane-producing microbial community in solid-state biogas reactor. **Biotechnology for Biofuels**, v. 6, n. 1, p. 3, 15 jan. 2013.

LI, H. et al. Mass balances and distributions of C, N, and P in the anaerobic digestion of different substrates and relationships between products and substrates. **Chemical Engineering Journal**, v. 287, p. 329–336, 1 mar. 2016.

LIM, S. J. et al. Nitrate removal in a packed bed reactor using volatile fatty acids from anaerobic acidogenesis of food wastes. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 11, n. 6, p. 538–543, 1 dez. 2006.

LIN, R. et al. Improved efficiency of anaerobic digestion through direct interspecies electron transfer at mesophilic and thermophilic temperature ranges. **Chemical Engineering Journal**, v. 350, p. 681–691, 15 out. 2018.

LIN, Y.-C. et al. Production of hydrogen from rice straw using microwave-induced pyrolysis. **Fuel**, v. 119, p. 21–26, 1 mar. 2014.

LIU, Q.; LUO, L.; ZHENG, L. Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 2, 1 fev. 2018.

LIU, Y. et al. Applying an electric field in a built-in zero valent iron – Anaerobic reactor for enhancement of sludge granulation. **Water Research**, v. 45, n. 3, p. 1258–1266, 1 jan. 2011.

LIU, Y. et al. Optimization of anaerobic acidogenesis by adding Fe⁰ powder to enhance anaerobic wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 192, p. 179–185, 1 jun. 2012.

LIU, Y.; WHITMAN, W. B. Metabolic, Phylogenetic, and Ecological Diversity of the Methanogenic Archaea. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1125, n. 1, p. 171–189, 2008.

LIZASOAIN, J. et al. Biogas production from reed biomass: Effect of pretreatment using different steam explosion conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 95, p. 84–91, 1 dez. 2016.

LOPES, K.; MARTINS, E. M.; MIRANDA, R. L. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. **Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**, v. 5, n. 1, p. 94, 29 maio 2019.

LUKITAWESA, NULL et al. Factors influencing volatile fatty acids production from food wastes via anaerobic digestion. **Bioengineered**, v. 11, n. 1, p. 39–52, 1 jan. 2020.

LUO, G.; WANG, W.; ANGELIDAKI, I. Anaerobic Digestion for Simultaneous Sewage Sludge Treatment and CO₂ Biomethanation: Process Performance and Microbial Ecology. **Environmental Science & Technology**, p. 130904143045005, 4 set. 2013.

MA, G.; CHEN, Y.; NDEGWA, P. Association between methane yield and microbiota abundance in the anaerobic digestion process: A meta-regression. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110212, 1 jan. 2021.

MADIGAN, M. T. et al. **Microbiologia de Brock - 14ª Edição**. [s.l.] Artmed Editora, 2016.

MANYI-LOH, C. E.; LUES, R. Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. **Fermentation**, v. 9, n. 8, p. 755, ago. 2023.

MANZOLI, J. M. et al. POTENCIAL DE REDUÇÃO DE MICRORGANISMOS TERMOTOLERANTES DE EFLUENTES DA PECUÁRIA BOVINA LEITEIRA POR MEIO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA COM E SEM INOCULAÇÃO. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, p. 1409–1420, 6 dez. 2022.

MAPA. **Lúpulo no Brasil: Perspectivas e Realidade**. 1. ed. Brasil: Eduardo Martins Soares, 2022.

MARKOU, G. et al. Methane production through anaerobic digestion of residual microalgal biomass after the extraction of valuable compounds. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 2, p. 419–426, 1 fev. 2022.

MARTINEZ, L. F. et al. Geo Biogas & Tech: leading sustainable energy transition in Brazil through biogas business. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 26, n. 2, p. 341–354, 11 abr. 2023.

MEEGODA, J. N. et al. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 10, p. 2224, out. 2018.

MENDIETA, O. et al. Synergistic effect of sugarcane scum as an accelerant co-substrate on anaerobic co-digestion with agricultural crop residues from non-centrifugal cane sugar agribusiness sector. **Bioresource Technology**, v. 303, p. 122957, 1 maio 2020.

MIELE, M. et al. Tratamento dos efluentes de usinas de biogás. **Revista de Política Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 31–46, 20 maio 2015.

MIR, M. A.; HUSSAIN, A.; VERMA, C. Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1181696, 31 dez. 2016.

MIRMOHAMADSADEGHI, S. et al. Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, p. 100202, 1 set. 2019.

MME. **RenovaBio - Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

MOCKAITIS, G. et al. Acidic and thermal pre-treatments for anaerobic digestion inoculum to improve hydrogen and volatile fatty acid production using xylose as the substrate. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1388–1398, 1 jan. 2020.

MÖLLER, K.; MÜLLER, T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. **Engineering in Life Sciences**, v. 12, n. 3, p. 242–257, 2012.

MONGELLI, A. et al. Are *Humulus lupulus* L. ecotypes and cultivars suitable for the cultivation of aromatic hop in Italy? A phytochemical approach. **Industrial Crops and Products**, v. 83, p. 693–700, 1 maio 2016.

MONLAU, F. et al. **Do by-products of thermochemical treatment of lignocellulosic materials inhibit anaerobic mixed cultures? Overview of recent findings**. Em: 13. WORLD CONGRESS ON ANAEROBIC DIGESTION: RECOVERING (BIO) RESOURCES FOR THE WORLD. AD13. Juan M. Lema, Fernando Fdez-Polanco, Marta Carballa, Jorge Rodriguez, Sonia Suarez 2013, 25 jun. 2013. Disponível em: <<https://hal.inrae.fr/hal-02750144>>. Acesso em: 21 fev. 2024

MONROY, C. R.; ACITORES, G. M.; CIFUENTES, G. N. **Electricity generation in Chile using non-conventional renewable energy sources – A focus on biomass**

- **ScienceDirect**. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312054?casa_token=yu49kDUO3ZYAAAAA:zKmR39EOFqRyqQGJ9FeLBc99KjSdmQduTMEEzFT1y8GmOx9IPeaYDcxqgsNfSiZiYXSgXZphOg>. Acesso em: 13 dez. 2022.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.

MORAES, S. L. DE et al. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **REVISTA IPT TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**, v. 1, n. 4, 2017.

MOSADEGH RANJBAR, F.; KARRABI, M.; SHAHNAVAZ, B. Bioconversion of wheat straw to energy via anaerobic co-digestion with cattle manure in batch-mode bioreactors (Experimental investigation and kinetic modeling). **Fuel**, v. 320, p. 123946, 15 jul. 2022.

MOSTAFA IMENI, S. et al. Techno-economic assessment of anaerobic co-digestion of livestock manure and cheese whey (Cow, Goat & Sheep) at small to medium dairy farms. **Bioresource Technology**, v. 291, p. 121872, 1 nov. 2019.

MOURATIDIS, P. X. E. et al. An investigation into the anticancer effects and mechanism of action of hop β -acid lupulone and its natural and synthetic derivatives in prostate cancer cells. **Nutrition and cancer**, v. 65, n. 7, p. 1086–1092, 2013.

MURATÇOBANOĞLU, H. et al. Simultaneous synergistic effects of graphite addition and co-digestion of food waste and cow manure: Biogas production and microbial community. **Bioresource Technology**, v. 309, p. 123365, 1 ago. 2020.

NAKASHIMA, G. T. et al. Lignocellulosic Materials: Characterization and Production of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 150–162, 2017.

NAKASU, P. Y. S. et al. Acid post-hydrolysis of xylooligosaccharides from hydrothermal pretreatment for pentose ethanol production. **Fuel**, v. 185, p. 73–84, 2016.

NANDA, S. et al. Characterization of North American Lignocellulosic Biomass and Biochars in Terms of their Candidacy for Alternate Renewable Fuels. **BioEnergy Research**, v. 6, n. 2, p. 663–677, 1 jun. 2013.

NELSON, M. C.; MORRISON, M.; YU, Z. A meta-analysis of the microbial diversity observed in anaerobic digesters. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 4, p. 3730–3739, 1 fev. 2011.

NESHAT, S. A. et al. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308–322, 1 nov. 2017.

NEW ENGLAND BIOLABS. **NEBNext Library Quant Kit Quick Protocol (E7630)**. , 2015. Disponível em: <<https://www.neb.com/en/protocols/2015/05/14/nebnext-library-quant-kit-quick-protocol-e7630>>. Acesso em: 22 nov. 2023

NGUYEN, D. D. et al. Thermophilic anaerobic digestion of model organic wastes: Evaluation of biomethane production and multiple kinetic models analysis. **Bioresource Technology**, v. 280, p. 269–276, 1 maio 2019.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S.; LORA, E. S. Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, 17 ago. 2021.

NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário: Coleta, Transporte, Tratamento e Reúso Agrícola**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

O'FLAHERTY, V.; COLLINS, G.; MAHONY, T. The microbiology and biochemistry of anaerobic bioreactors with relevance to domestic sewage treatment. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 5, n. 1, p. 39–55, 2006.

OKOLIE, J. A. et al. Supercritical water gasification of biomass: a state-of-the-art review of process parameters, reaction mechanisms and catalysis. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 3, n. 3, p. 578–598, 27 fev. 2019.

OLATUNJI, K. O.; AHMED, N. A.; OGUNKUNLE, O. Optimization of biogas yield from lignocellulosic materials with different pretreatment methods: a review. **Biotechnology for Biofuels**, v. 14, n. 1, p. 159, 19 jul. 2021.

OLESZKIEWICZ, J. A.; SHARMA, V. K. Stimulation and inhibition of anaerobic processes by heavy metals—A review. **Biological Wastes**, v. 31, n. 1, p. 45–67, 1 jan. 1990.

OLIVA, A. et al. Effect of methanol-organosolv pretreatment on anaerobic digestion of lignocellulosic materials. **Renewable Energy**, v. 169, p. 1000–1012, 1 maio 2021.

OVEREND, R. P. et al. Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 321, n. 1561, p. 523–536, jan. 1997.

PARVEZ, A. M. et al. Microwave-assisted biomass pyrolysis polygeneration process using a scaled-up reactor: Product characterization, thermodynamic assessment and bio-hydrogen production. **Biomass and Bioenergy**, v. 139, p. 105651, 1 ago. 2020.

PASALARI, H. et al. Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: A systematic review. **Chemosphere**, v. 270, p. 128618, 1 maio 2021.

PASSOS, F.; FERRER, I. Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production. **Water Research**, v. 68, p. 364–373, 1 jan. 2015.

PHUTTARO, C. et al. Anaerobic digestion of hydrothermally-pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield. **Bioresource Technology**, v. 284, p. 128–138, 1 jul. 2019.

PONNUSAMY, V. K. et al. A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. **Bioresource Technology**, v. 271, p. 462–472, 1 jan. 2019.

POPP, A. et al. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 331–345, 1 jan. 2017.

PORTUGAL, L. **Análise de preservação de água no solo na cultura irrigada de lúpulo com o uso de cobertura morta**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (Unesp), 28 jan. 2021.

QIAO, J.-T. et al. Molecular characterization of bacterial and archaeal communities in a full-scale anaerobic reactor treating corn straw. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 512–518, 1 set. 2013.

RABELO, S. C.; PRADELLA, J. G. DA C.; IENCZAK, J. L. **Biotecnologia Industrial - Vol. 3: Processos fermentados e enzimáticos**. [s.l.] Editora Blucher, 2019. v. 3

RAHMANI, A. M. et al. Hydrothermal and thermal-alkali pretreatments of wheat straw: Co-digestion, substrate solubilization, biogas yield and kinetic study. **Environmental Research**, v. 216, p. 114436, 1 jan. 2023.

RAJAGOPAL, G.; KANNAN, S. Systematic characterization of potential cellulolytic marine actinobacteria *Actinoalloteichus* sp. MHA15. **Biotechnology Reports**, v. 13, p. 30–36, 1 mar. 2017.

RAJENDRAN, K. et al. Experimental and economical evaluation of a novel biogas digester. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 183–191, 1 out. 2013.

RAJENDRAN, K. et al. Updates on the pretreatment of lignocellulosic feedstocks for bioenergy production—a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 8, n. 2, p. 471–483, 1 jun. 2018.

RAJENDRAN, K. et al. Advancing anaerobic digestion through two-stage processes: Current developments and future trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 123, p. 109746, 1 maio 2020.

RAPOSO, F. et al. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 86, n. 8, p. 1088–1098, 2011.

RASHAMA, C.; IJOMA, G. N.; MATAMBO, T. S. Elucidating Biodegradation Kinetics and Biomethane Potential Trends in Substrates Containing High Levels of Phytochemicals: The Case of Avocado Oil Processing By-products. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, n. 4, p. 2071–2081, 1 abr. 2022.

REMMAS, N. et al. A Critical Review on the Microbial Ecology of Landfill Leachate Treatment Systems. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 949, jan. 2023.

RNC. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Informativo. Disponível em:

<https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php>. Acesso em: 6 mar. 2023.

ROCHA, G. J. DE M. et al. A fast and accurate method for determination of cellulose and polyoses by HPLC. **Proceedings**, 1997.

RODAS, D. P. V.; BOTTON, J. P.; FURTADO, A. C. **Fundamentos de Biodigestão Anaeróbia. Conceitos e Processos**. [s.l.] Brazil Publishing, 2020.

RÖDER, M.; WELFLE, A. Bioenergy. Em: **Managing Global Warming**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 379–398.

RODRIGUES, M. A.; MORAIS, J. S.; CASTRO, J. P. O lúpulo: da cultura ao extrato. Técnica cultural tradicional. **Livro de atas das Jornadas do Lúpulo e da Cerveja: novas oportunidades de negócio**, p. 1–10, 2015.

ROEHRER, S. et al. Analyzing bioactive effects of the minor hop compound xanthohumol C on human breast cancer cells using quantitative proteomics. **PLoS ONE**, v. 14, n. 3, 1 mar. 2019.

ROMERO-GÜIZA, M. S. et al. The role of additives on anaerobic digestion: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1486–1499, 1 maio 2016.

RUIZ, H. A.; THOMSEN, M. H.; TRAJANO, H. L. **Hydrothermal Processing in Biorefineries: Production of Bioethanol and High Added-Value Compounds of Second and Third Generation Biomass**. [s.l.] Springer, 2017.

SAHOO, A.; KUMAR, S.; MOHANTY, K. A comprehensive characterization of non-edible lignocellulosic biomass to elucidate their biofuel production potential. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 11, p. 5087–5103, 1 nov. 2022.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. v. 29, 2017.

SANTUCCI, B. et al. Autohydrolysis of Hemicelluloses from Sugarcane Bagasse During Hydrothermal Pretreatment: a Kinetic Assessment. **Bioenergy Research**, v. 8, n. 4, p. 1778–1787, 2015a.

SANTUCCI, B. S. et al. Autohydrolysis of Hemicelluloses from Sugarcane Bagasse During Hydrothermal Pretreatment: a Kinetic Assessment. **BioEnergy Research**, v. 8, n. 4, p. 1778–1787, 1 dez. 2015b.

SAWATDEENARUNAT, C. et al. Anaerobic biorefinery: Current status, challenges, and opportunities. **Bioresource Technology**, Waste Biorefinery - Advocating Circular Economy. v. 215, p. 304–313, 1 set. 2016.

SCHERER, P.; LIPPERT, H.; WOLFF, G. Composition of the major elements and trace elements of 10 methanogenic bacteria determined by inductively coupled plasma emission spectrometry. **Biological Trace Element Research**, v. 5, n. 3, p. 149–163, 1 jun. 1983.

SEEG. **Emissões por setor**. Informativo. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ŞENOL, H. Enhancement in methane yield from anaerobic co-digestion of walnut shells and cattle manure. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 39, n. 6, nov. 2020.

SHAH, F. A. et al. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 627–642, 1 fev. 2015.

SHEN, X. et al. Compositional characteristics and energy potential of Chinese animal manure by type and as a whole. **Applied Energy**, v. 160, p. 108–119, 15 dez. 2015.

SHI, K. et al. Microwave-assisted pyrolysis of bamboo coupled with reforming by activated carbon for the production of hydrogen-rich syngas. **Energy Procedia**, Proceedings of the 9th International Conference on Applied Energy. v. 142, p. 1640–1646, 1 dez. 2017.

SHOKRALLA, S. et al. Next-generation sequencing technologies for environmental DNA research. **Molecular Ecology**, v. 21, n. 8, p. 1794–1805, 2012.

SICCHIERI, I. M. et al. Selection, composition, and validation of standard inoculum for anaerobic digestion assays. **Biomass and Bioenergy**, v. 164, p. 106558, 1 set. 2022.

SIEGERT, I.; BANKS, C. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 11, p. 3412–3418, 1 nov. 2005.

SINGH, P.; KALAMDHAD, A. S. Assessment of agricultural residue-based electricity production from biogas in India: Resource-environment-economic analysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, p. 102843, 1 dez. 2022.

SINGH, Y. D.; MAHANTA, P.; BORA, U. Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production. **Renewable Energy**, v. 103, p. 490–500, 1 abr. 2017.

SLEPETIENE, A. et al. The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. **Waste Management**, v. 102, p. 441–451, 1 fev. 2020.

SLUITER, J. B. et al. Evaluation of Brazilian sugarcane bagasse characterization: An interlaboratory comparison study. **Journal of AOAC International**, v. 99, n. 3, p. 579–585, 2016.

SONG, X. et al. Effect of hydrothermal pretreatment severity on the pretreatment characteristics and anaerobic digestion performance of corn stover. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121646, 1 out. 2019.

SPÓSITO, M. B. et al. **A cultura do lúpulo**Série Produtor Rural. [s.l.: s.n.].

SPÓSITO, M. B. et al. **A Cultura do Lúpulo**. Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca: Eliana Maria Garcia, 2019b.

SRIDEVI, V. et al. Challenges and opportunities in the production of sustainable hydrogen from lignocellulosic biomass using microwave-assisted pyrolysis: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, 1 jul. 2023.

SUGIYAMA, R.; ODA, H.; KUROSAKI, F. Two distinct phases of glandular trichome development in hop (*Humulus lupulus* L.). **Plant Biotechnology**, v. 23, n. 5, p. 493–496, 2006.

SUN, B. et al. Application of biofertilizer containing *Bacillus subtilis* reduced the nitrogen loss in agricultural soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 148, p. 107911, 1 set. 2020.

SUREK, E.; BUYUKKILECI, A. O. Production of xylooligosaccharides by autohydrolysis of hazelnut (*Corylus avellana* L.) shell. **Carbohydrate Polymers**, v. 174, p. 565–571, 15 out. 2017.

TAMBONE, F. et al. Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 1251–1256, 1 nov. 2017.

THOMPSON, T. M.; YOUNG, B. R.; BAROUTIAN, S. Efficiency of hydrothermal pretreatment on the anaerobic digestion of pelagic *Sargassum* for biogas and fertiliser recovery. **Fuel**, v. 279, p. 118527, 1 nov. 2020.

TOERIEN, D. F.; HATTINGH, W. H. J. Anaerobic digestion I. The microbiology of anaerobic digestion. **Water Research**, v. 3, n. 6, p. 385–416, 1 jun. 1969.

TOSCAN, A. et al. New two-stage pretreatment for the fractionation of lignocellulosic components using hydrothermal pretreatment followed by imidazole delignification: Focus on the polysaccharide valorization. **Bioresource Technology**, v. 285, p. 121346, 1 ago. 2019.

TSAPEKOS, P. et al. Anaerobic co-digestion of macroalgal biomass with cattle manure under high salinity conditions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105406, 1 ago. 2021.

TYAGI, V. K. et al. Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 380–399, 1 out. 2018.

TYAGI, V. K. et al. Microbial community dynamics in anaerobic digesters treating organic fraction of municipal solid waste. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101303, 1 fev. 2021.

ULUKARDESLER, A. H. Anaerobic co-digestion of grass and cow manure: kinetic and GHG calculations. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 6320, 18 abr. 2023.

VAN CLEEMPUT, M. et al. Hop (*Humulus lupulus*)-derived bitter acids as multipotent bioactive compounds. **Journal of natural products**, v. 72, n. 6, p. 1220–1230, 26 jun. 2009.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**, v. 94, p. 1–33, 1 abr. 2012.

VDI 4630. **Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. [s.l.: s.n.].

VINTILOIU, A. et al. Mineral substances and macronutrients in the anaerobic conversion of biomass: An impact evaluation. **Engineering in Life Sciences**, v. 12, n. 3, p. 287–294, 2012.

VOLPI, M. PAULA. C. et al. Use of Lignocellulosic Residue from Second-Generation Ethanol Production to Enhance Methane Production Through Co-digestion. **BioEnergy Research**, v. 15, n. 1, p. 602–616, 1 mar. 2022.

WAGNER, A. O. et al. Biological Pretreatment Strategies for Second-Generation Lignocellulosic Resources to Enhance Biogas Production. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1797, jul. 2018.

WALKER, L.; CHARLES, W.; CORD-RUWISCH, R. Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes. **Bioresource Technology**, Selected papers from the International Conference on Technologies and Strategic Management of Sustainable Biosystems. v. 100, n. 16, p. 3799–3807, 1 ago. 2009.

WANG, D. et al. Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass? **Bioresource Technology**, v. 249, p. 117–124, 1 fev. 2018a.

WANG, H. et al. Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system. **Water Research**, v. 46, n. 4, p. 1070–1078, 15 mar. 2012a.

WANG, X. et al. Pyrosequencing Analysis of Bacterial Diversity in 14 Wastewater Treatment Systems in China. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 78, n. 19, p. 7042–7047, out. 2012b.

WANG, X. et al. Study on improving anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw by fruit and vegetable waste: Methane production and microbial community in CSTR process. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 290–297, 1 fev. 2018b.

WARD, A. J. et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 1 nov. 2008.

WHITMAN, W. B.; BOWEN, T. L.; BOONE, D. R. The Methanogenic Bacteria. Em: DWORKIN, M. et al. (Eds.). **The Prokaryotes: Volume 3: Archaea. Bacteria: Firmicutes, Actinomycetes**. New York, NY: Springer, 2006. p. 165–207.

WIJEKOON, K. C.; VISVANATHAN, C.; ABEYNAYAKA, A. Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, Special Issue on Challenges in Environmental Science and Engineering, CESE-2010: Technological Advances in Waste Treatment for a Sustainable Future. v. 102, n. 9, p. 5353–5360, 1 maio 2011.

WU, L.-J. et al. Effects of Potassium, Magnesium, Zinc, and Manganese Addition on the Anaerobic Digestion of De-oiled Grease Trap Waste. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 41, n. 7, p. 2417–2427, 1 jul. 2016.

XIA, Y. et al. Thermophilic microbial cellulose decomposition and methanogenesis pathways recharacterized by metatranscriptomic and metagenomic analysis. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 6708, 21 out. 2014.

XU, L. et al. Performance and microbial community analysis of dry anaerobic co-digestion of rice straw and cow manure with added limonite. **Biomass and Bioenergy**, v. 126, p. 41–46, 1 jul. 2019.

YAN, L. et al. Diversity of a mesophilic lignocellulolytic microbial consortium which is useful for enhancement of biogas production. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 49–54, 1 maio 2012.

YANG, L. et al. Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 105, p. 153–159, 1 nov. 2015.

YIN, Q. et al. Clarifying electron transfer and metagenomic analysis of microbial community in the methane production process with the addition of ferroferric oxide. **Chemical Engineering Journal**, v. 333, p. 216–225, 1 fev. 2018.

YOUSEFIFAR, A. et al. Fundamental mechanisms and reactions in non-catalytic subcritical hydrothermal processes: A review. **Water Research**, v. 123, p. 607–622, 15 out. 2017.

ZACHAROF, M.-P. et al. Valorization of spent anaerobic digester effluents through production of platform chemicals using *Clostridium butyricum*. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 294–303, 1 out. 2015.

ZAPAROLLI, D.; VASCONSELOS, Y. Menos metano no pasto: soluções tecnológicas podem ajudar a pecuária a reduzir as emissões de gases de efeito estufa. **Pesquisa Fapesp**, n. 314, p. 29–37, 2022.

ZENG, Y.; DE GUARDIA, A.; DABERT, P. Improving composting as a post-treatment of anaerobic digestate. **Bioresource Technology**, v. 201, p. 293–303, 1 fev. 2016.

ZERBACK, T. et al. Hydrothermal Pretreatment of Wheat Straw—Evaluating the Effect of Substrate Disintegration on the Digestibility in Anaerobic Digestion. **Processes**, v. 10, n. 6, p. 1048, jun. 2022.

ZHANG, J. et al. Recent achievements in enhancing anaerobic digestion with carbon- based functional materials. **Bioresource Technology**, v. 266, p. 555–567, 1 out. 2018.

ZHAO, X. et al. Microwave pyrolysis of straw bale and energy balance analysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 92, n. 1, p. 43–49, 1 set. 2011.

ZHAO, Y. et al. Co-digestion of oat straw and cow manure during anaerobic digestion: Stimulative and inhibitory effects on fermentation. **Bioresource Technology**, v. 269, p. 143–152, 1 dez. 2018.

ZHONG, W. et al. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 24, p. 11177–11182, 1 dez. 2011.

ZHOU, M. et al. Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. **Bioresource Technology**, Bioconversion of Food Wastes. v. 248, p. 68–78, 1 jan. 2018.

ZHU, X. et al. Metabolic dependencies govern microbial syntrophies during methanogenesis in an anaerobic digestion ecosystem. **Microbiome**, v. 8, n. 1, p. 22, 15 fev. 2020.

ZIGANSHIN, A. M. et al. Microbial community structure and dynamics during anaerobic digestion of various agricultural waste materials. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, n. 11, p. 5161–5174, 1 jun. 2013.

ZOGHLAMI, A.; PAËS, G. Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis. **Frontiers in Chemistry**, v. 7, p. 874, 18 dez. 2019.