



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

**CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) APLICADA À VALORIZAÇÃO DA
MATÉRIA ORGÂNICA DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA:
UMA BREVE REVISÃO**

Jonas Gabriel de Souza França

Recife, Pernambuco
Março de 2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

**CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) APLICADA À VALORIZAÇÃO DA
MATÉRIA ORGÂNICA DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA:
UMA BREVE REVISÃO**

Jonas Gabriel de Souza França

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Química como pré-requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química pela Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Orientador: Prof. Dr. Ramom Rachide Nunes

Recife, Pernambuco
Março de 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F815c França, Jonas Gabriel de Souza
CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) APLICADA À VALORIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DOS
RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA: UMA BREVE REVISÃO / Jonas Gabriel de Souza França. - 2024.
49 f. : il.

Orientador: Ramom Rachide Nunes.
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Licenciatura em Química,
Recife, 2024.

1. Hidrocarvão. 2. Cana-de-açúcar. 3. Tecnologia ambiental. 4. Matéria orgânica. 5. Desenvolvimento agrário. I.
Nunes, Ramom Rachide, orient. II. Título

CDD 540



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

**CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) APLICADA À VALORIZAÇÃO DA
MATÉRIA ORGÂNICA DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA:
UMA BREVE REVISÃO**

Jonas Gabriel de Souza França

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Química como pré-requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química pela Universidade Federal Rural de Pernambuco.

() APROVADA em 01 de março de 2024.

Banca examinadora: Profa. Dra. Mônica Freire Belian (UFRPE)

Dra. Lidiane Macedo Alves de Lima (UFRPE)

Orientador: Prof. Dr. Ramom Rachide Nunes (UFRPE)

Recife, Pernambuco
Março de 2024

AGRADECIMENTOS

À mim, pois só eu sei o que eu mesmo passei, e ainda passarei, mas sigo suportando e superando todos os percalços enfrentados não só nesses 5 anos, mas na minha vida inteira.

À minha família, minha mãe, meu pai, meu irmão, minhas tias e tios, minhas avós e em especial para meu avô, o qual herdo o nome de Jonas. Obrigado por acreditar em mim desde sempre vô! E serei não só o seu cientista, mas agora um cientista para o mundo.

À Andry, minha namorada, que foi uma das poucas que esteve no meu lado ouvindo, me aconselhando e me ajudando a passar por quase todo perrengue que passei durante os 5 anos de graduação, dentro e fora da universidade. Também agradeço por você ser aquela com quem eu almejo compartilhar a vida futura e construir nossos sonhos. Amo você e nosso filho felino, Dalton.

Aos meus amigos quase irmãos, Hygor, Jadson e Gabriel, que me deram vários conselhos e apoio desde o tempo do IFPE e que perduram até hoje. A amizade de vocês é sensacional, e almejo que ela perdure cada vez mais.

Aos meus amigos que perdurarão para além da graduação, Lipe, Thierry e Tonho, que foram e são uma grata surpresa na minha vida, almejo contar com vocês pro resto da vida, e que seja recíproco. Espero, cada dia mais, vivenciar as mais aletórias experiências com vocês.

Aos meus amigos da graduação, Matheus, Duda, Isabelle, Islla e Almir que passaram os perrengues nas cadeiras comigo. “Parafraseando” a banda aviões do forró: A gente briga, a gente chora, talvez se ama, mas depois fica tudo bem. Adendo especial para Matheus, Duda e Almir pela nossa conquista do mestrado, mediante dias exaustivos de estudo e loucuras diárias.

Ao meu orientador prof. Ramom Rachide, pela oportunidade de trabalhar no seu grupo, aprender novas perspectivas e aumentar minha gama de conhecimentos na área.

Ao meu grupo de pesquisa, o Laboratório de Química Ambiental (LQA), em especial o André, afilhado que a rural me deu, e o Almir. Vocês deixam o dia no laboratório mais leve, mais musical e mais engraçado quando estão lá.

Às minhas novas amigadas do LaMTESA, que me ajudaram e ajudarão não só nessa transição de graduação para a pós-graduação, mas também com os conselhos e esporros que

precisei para acordar para a vida. Tendo um adendo especial para as minhas queridas amigas: Thayná, Thayane, Dani, Bianca e Marília que me ajudaram e aconselharam nos dias difíceis.

À professora Maria José, pela grande e incrível pessoa que é, tal qual uma mãe para mim na universidade desde o momento que nos conhecemos. Agradeço pelas incríveis oportunidades e ensinamentos que foram a mim proporcionadas, tanto profissionalmente quanto de maneira pessoal.

À professora Bete, que não só ministrou a melhor matéria que eu cursei, como também foi a melhor professora que tive durante o curso inteiro. Por ser essa pessoa e professora incrível, não só para mim, mas como para todos os “**alunos**”. Além de ser um exemplo de professora que beira a perfeição nos meus conceitos do que é ser um professor excepcional. Almejo ser, pelo menos, metade do que você foi e ainda é.

À UFRPE, vulgo ruralinda, local onde tive o prazer de estudar e me profissionalizar durante esses 5 anos e, também, de conhecer pessoas incríveis para minha vida.

A todos vocês, minha sincera gratidão. Esta conquista também é reflexo do apoio, ensinamentos e amor que recebi de cada um.

“É isso que faz um herói, não? Parte da jornada é o fim.”

— Tony Stark

RESUMO

O hidrocarvão (HC), é o principal produto de uma tecnologia ambiental, a carbonização hidrotérmica (HTC). A HTC é muito usada na mitigação dos impactos gerados pelas indústrias agrícolas, já que elas desempenham um papel essencial na abordagem dos desafios enfrentados pelo meio ambiente devido às atividades humanas. Em Pernambuco, essas tecnologias ambientais vêm ganhando destaque, principalmente na mitigação dos problemas relativos à produção da cana-de-açúcar. A Carbonização Hidrotérmica tem se mostrado como uma tecnologia ambiental efetiva para promover o manejo ideal dos resíduos agrícolas. A HTC é uma tecnologia ambiental, que visa a transformação da matéria orgânica (MO) da biomassa em um material com maior valor agregado, como o hidrocarvão. De modo geral, a HTC é realizada em um reator, onde se coloca a biomassa e uma solução aquosa, que será submetido a temperaturas brandas (180-250°) e pressões autogeradas. É uma tecnologia promissora para o tratamento de resíduos agrícolas, em especial da indústria sucroalcooleira, visto que os resíduos gerados por essa indústria, o bagaço, a vinhaça e a torta de filtro, apresentam um grande teor de MO, tornando a HTC mais efetiva. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica para analisar o uso desses resíduos agrícolas da indústria sucroalcooleira, como matéria-prima no preparo de hidrocarvões via HTC.

Palavras-chave: Hidrocarvão; cana-de-açúcar; tecnologia ambiental; matéria orgânica; desenvolvimento agrário.

ABSTRACT

Hydrochar (HC) is the main product of an environmental technology hydrothermal carbonization (HTC). HTC is widely used to mitigate the impacts generated by agricultural industries as they play an essential role in addressing the challenges faced by the environment due to human activities. In Pernambuco State these environmental technologies have been gaining prominence, mainly in mitigating problems related to sugarcane production. Hydrothermal Carbonization has proven to be an effective environmental technology to promote optimal management of agricultural waste. HTC is an environmental technology that aims to transform the organic matter (OM) in biomass into a material with greater added value, named as hydrochar. Generally, HTC is performed in a reactor, where the biomass and an aqueous solution are placed and subjected to mild temperatures (180-250°) and self-generated pressures. It has been approached as a promising technology for treating agricultural waste, especially those from the sugar and alcohol industry. Since the waste generated by this industry (e.g., bagasse, vinasse and filter cake) has a high OM content, HTC is more effective. Thus, this work aimed to carry out a literature review to analyze the use of these agricultural residues from the sugar and alcohol industry, as feedstock in the production of hydrochars via HTC.

Keywords: Hydrochar; sugarcane; environmental technology; organic matter; agrarian development.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros experimentais utilizados na HTC dos estudos pesquisados	38
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores de produção de Cana-de-açúcar no Brasil	16
Figura 2. Valores de produção de Cana-de-açúcar no estado de Pernambuco.....	18
Figura 3. Fotografia de canavial irregular em Pernambuco.	19
Figura 4. Fluxograma básico de fabricação de açúcar e etanol	21
Figura 5. Fotografia do bagaço seco.....	22
Figura 6. Aplicação da torta de filtro no solo com carreta distribuidora de torta de filtro.....	23
Figura 7. Aplicação de vinhaça no solo	24
Figura 8. Representação da transformação da MO	25
Figura 9. Esquema de formação das substâncias húmicas	27
Figura 10. Fotografia de biorrefinaria de etanol 2G da GranBio.	29
Figura 11. Esquema do processo de pirólise	31
Figura 12. Aplicação de biocarvão no solo	31
Figura 13. Fotografia do invólucro de metal do reator de HTC	33
Figura 14. Esquema de reações dentro do reator.....	33
Figura 15. Representação da cana-de-açúcar pré e pós preparo de amostra	34
Figura 16. Representação dos materiais sendo colocados no reator	35
Figura 17. Representação do reator e do invólucro de metal	35
Figura 18. Representação do reator, dentro do invólucro, e do forno	36
Figura 19. Representação da frações do hidrocarvão	36
Figura 20. Hidrocarvão produzido em laboratório	40
Figura 21. Esquema das diferenças entre hidrocarvão e o biocarvão.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

CONAB - Companhia Nacional Abastecimento do Brasil

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

HTC - Carbonização Hidrotérmica

FA - Ácidos Fúlvicos

HA - Ácidos Húmicos

Hum - Humina

HC - Hidrocarvão

MO - Matéria Orgânica

η - Rendimento de reação

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	METODOLOGIA.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA	16
3.2	RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA E SUAS COMPOSIÇÕES	20
3.2.1	Bagaçõ.....	22
3.2.2	Torta de filtro.....	23
3.2.3	Vinhaça.....	24
3.3	MATÉRIA ORGÂNICA	25
3.4	TECNOLOGIAS AMBIENTAIS E A QUÍMICA DOS NOVOS MATERIAIS: ALTERNATIVAS E SOLUÇÕES	27
3.4.1	Compostagem.....	28
3.4.2	Vermicompostagem.....	28
3.4.3	Biorrefinarias.....	29
3.4.4	Pirólise	30
3.5	CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA – HTC	32
3.6	HIDROCARVÃO (HC).....	39
3.7	HIDROCARVÃO VS. BIOCARVÃO	41
4	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil. Segundo a Companhia Nacional Abastecimento do Brasil (CONAB) em 2023, o Brasil produziu na safra pouco menos de 700 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Na região Nordeste, Pernambuco foi o segundo estado com maior produção, produzindo cerca de 970 mil toneladas correspondentes apenas ao açúcar, ficando apenas atrás de Alagoas. Atualmente, a produção de cana-de-açúcar é majoritariamente atrelada como matéria-prima destinada à produção de açúcar e etanol. Embora omitido, junto a esta produção agrícola, uma grande quantidade de resíduos é gerada, sendo esse um desafio para o manejo adequado da colheita à produção industrial dos produtos à base da cana-de-açúcar.

No setor sucroalcooleiro são gerados principalmente 3 tipos de resíduos: o bagaço, a vinhaça e a torta de filtro. O bagaço se caracteriza como o resíduo fibroso restante após a extração do suco da cana-de-açúcar (utilizado como combustível na própria usina). A vinhaça é um subproduto líquido resultante da destilação do caldo de cana fermentado para a produção de etanol (frequentemente utilizado como fertilizante na agricultura). Por último, a torta de filtro é um resíduo sólido gerado no processo de clarificação do caldo da cana (rico em fósforo e geralmente utilizado como condicionador de solo). Dentre os três, o bagaço se destaca, devido à quantidade e o uso pouco nobre, podendo ser convertido em um material de maior valor agregado para uso agrícola, doméstico ou industrial.

Motivo de preocupação ambiental, a cultura de cana-de-açúcar é a que mais gera resíduos agrícolas. Segundo o levantamento do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), para cada tonelada beneficiada de cana-de-açúcar, são gerados aproximadamente 300 kg (30% do total da produção) de bagaço. O manejo desse resíduo aumenta anualmente, junto à produção, e necessita de um gerenciamento adequado, evitando problemas ambientais para o solo e principalmente para os corpos d'água.

A mitigação dos impactos ambientais e a busca por soluções inovadoras e sustentáveis têm levado ao desenvolvimento e aplicação de tecnologias e soluções ambientais, como no estudo descrito por Somorin *et al.* (2023), onde utilizaram de tecnologias ambientais para mitigar os impactos dos resíduos da cana, e produzir um material com maior valor agregado. Dentre essas tecnologias, baseado nos elevados teores de matéria orgânica do bagaço da cana-de-açúcar, a Carbonização Hidrotérmica (HTC) vem se mostrando promissora para o tratamento desses resíduos.

A HTC é uma tecnologia ambiental que visa a conversão da matéria orgânica (MO) dos resíduos agrícolas em um hidrocarvão (ou *hidrochar*, em inglês). Diferente do biocarvão, que é produzido a partir da pirólise da biomassa, o hidrocarvão apresenta um outro processo de produção e condições mais brandas de preparo. A HTC é realizada em um reator utilizando água como principal reagente (podendo ser soluções ácidas ou alcalinas), submetida a temperaturas entre 180°C e 250°C e a pressões autogeradas, em um tempo pré-determinado. Essa tecnologia oferece diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais de queima do bagaço, evitando a liberação de gases como CO₂, além de ser econômica e ambientalmente viável.

Para a produção do hidrocarvão via HTC, quanto maior o teor de MO, maior será a quantidade de material produzido. Em síntese, o uso da HTC para o manejo do bagaço da cana-de-açúcar se apresenta promissora, capaz de gerir os resíduos agrícolas, além de produzir um insumo agrícola de elevado potencial agrônômico.

O trabalho se justifica pois é um tema original e muito importante no ponto de vista da mitigação de impactos ambientais causados por uma das maiores indústrias agrícolas do país e como visto anteriormente, atrelado à grande produção agrícola, a geração dos resíduos também cresce. Mediante isso, como a tecnologia ambiental da HTC pode auxiliar no tratamento desses resíduos da indústria sucroalcooleira bem como a mitigação dos impactos ambientais causados por eles?

Por fim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão de literatura sobre o uso dos resíduos da indústria sucroalcooleira para produção de hidrocarvões, como também analisar como o rendimento da reação se relaciona com os parâmetros reacionais.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como tema de estudo analisar os parâmetros utilizados para o uso de resíduos agrícolas da indústria sucroalcooleira no preparo de hidrocarvões via carbonização hidrotérmica (HTC), através de uma revisão bibliográfica.

A pesquisa bibliográfica foi realizada seguindo os princípios de métodos de pesquisa e visa explorar o problema em detalhes, tornando-o mais preciso, possibilitando a investigação e produções científicas futuras. Em relação à metodologia empregada, o estudo pode ser categorizado como uma pesquisa bibliográfica. Isso se deve ao fato de que a investigação foi conduzida com base em uma revisão de materiais teóricos previamente examinados e divulgados por meio de canais digitais. Os principais recursos utilizados incluíram livros, periódicos, artigos científicos, monografias, dissertações, teses, páginas de sites, como os de agências governamentais envolvidas com agricultura (EMBRAPA, IBGE, entre outros). (Gerhardt; Silveira, 2009).

A literatura científica, traz diversos materiais científicos citadas nas principais bases de dados, incluindo SciELO, Periódicos da CAPES, Google Scholar, Scencedirect e Web of Science. Dois principais meios de acesso para as pesquisas de materiais realizadas nesse estudo foram utilizados: os periódicos da CAPES e o Google Acadêmico. Para refinar a coleta de dados, foram utilizados mecanismos de busca avançada, com filtros baseados em palavras-chave como "HTC", "Hydrochar", "Sugarcane" e "Hydrothermal carbonization". A busca avançada incluiu a seleção dos idiomas inglês e português como critério, e também a definição de um intervalo de tempo específico para a publicação dos materiais, abrangendo os últimos cinco anos (de 2019 a 2023). No entanto, devido à escassez de materiais que atendiam aos critérios de interesse para a construção da revisão como um todo, o período de busca teve que ser ampliado em mais 5 anos para incluir trabalhos anteriores. Este ajuste foi necessário para garantir a abrangência adequada na análise dos dados para esta revisão. Além disso, a falta de conteúdo implica na originalidade do trabalho proposto (tema da revisão). Os resultados das buscas foram analisados com base na matéria-prima utilizada, no resíduo utilizado e também se apresentavam dados de rendimento reacional da produção do hidrocarvão.

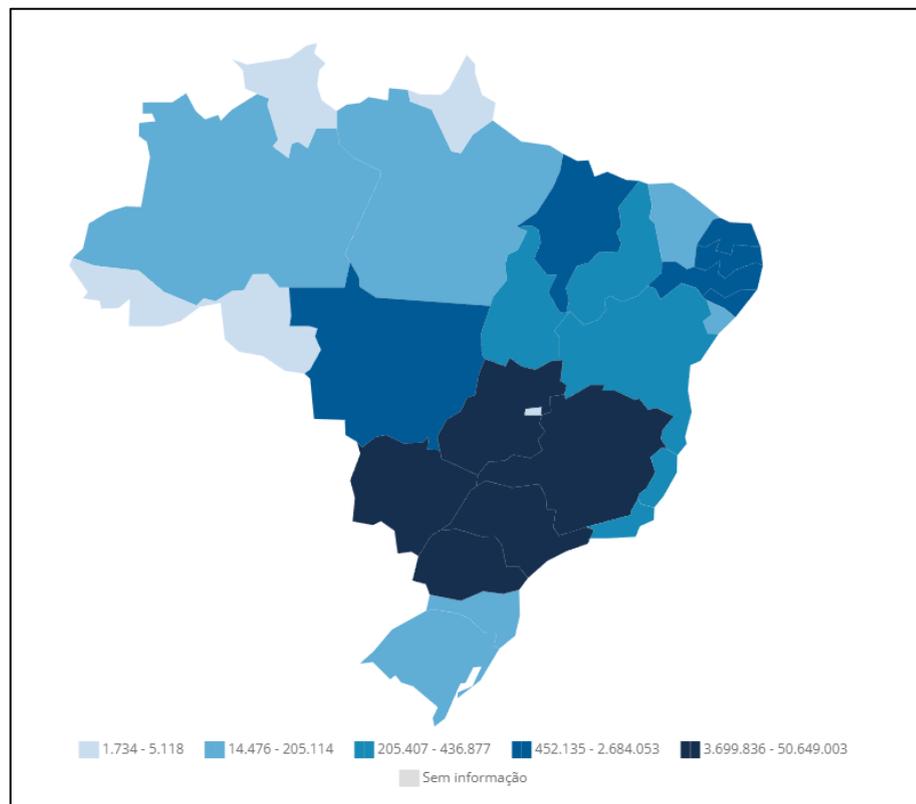
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

A indústria sucroalcooleira brasileira, mais que um setor produtivo, é uma força motriz da economia nacional. Enraizada na cultura e história do país, sua relevância se estende do campo, onde a cana-de-açúcar reina como principal matéria-prima, até as mesas dos brasileiros e os mercados internacionais, com produtos que alimentam e energizam o mundo (*Pereira et al.*, 2019).

Cultivada em mais de 9 milhões de hectares no Brasil, a cana-de-açúcar se destaca como um dos pilares da agroindústria nacional (**Figura 1**). Sua produção para a safra 2023/24, é estimada em 677,6 milhões de toneladas. Essa indústria movimenta uma complexa cadeia produtiva que gera emprego e renda para milhões de pessoas (BRASIL, 2023).

Figura 1. Valores de produção de Cana-de-açúcar no Brasil



FONTE: IBGE (2022).

A indústria sucroalcooleira é um dos setores mais importantes da economia brasileira, respondendo por 2,4% do PIB nacional e gerando cerca de 1,5 milhão de empregos diretos e indiretos. Além disso, contribui significativamente para a balança comercial brasileira, segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), com exportações de apenas etanol alcançando R\$ 2,6 milhões na safra 2022/23 (UNICA, 2023).

Segundo o departamento de agricultura dos Estados Unidos (USDA), o Brasil ostenta a posição de líder mundial na produção e exportação de açúcar, ocupando papel de destaque no cenário internacional, responsável por 22,4% da produção mundial de açúcar. Na safra 2020/21, o país produziu 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol, respondendo por 21% e 28% da produção global, respectivamente (USDA, 2023).

Com uma produção de 16.599.141 de toneladas de cana-de-açúcar em 2022, Pernambuco se posiciona como o sétimo maior produtor nacional de açúcar e, é o segundo maior da região Nordeste, ficando atrás somente de Alagoas. O estado deteve, aproximadamente, 2,6% da produção nacional de açúcar na safra de 2022/23, e, atualmente, o estado na safra 2023/24, deverá produzir 750 mil toneladas de açúcar, representando quase 32% da produção regional.

A jornada da cana-de-açúcar se inicia no campo, com o plantio, a colheita e o transporte para as usinas. Nesses locais, a matéria-prima é processada, passando por etapas como moagem, extração do caldo, purificação, cristalização e centrifugação, resultando em produtos como açúcar, etanol, biocombustíveis e outros derivados (UNICA - Açúcar, 2022).

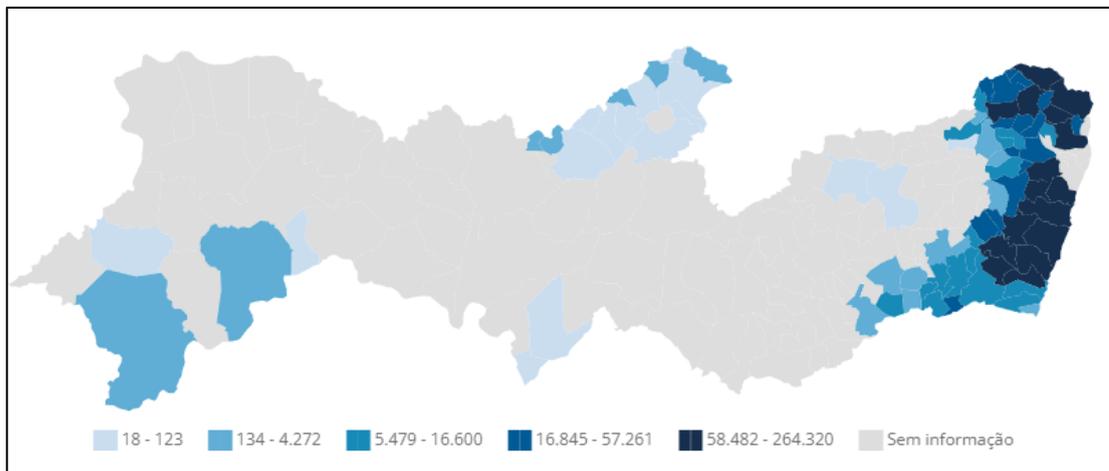
A indústria sucroalcooleira gera uma gama de produtos com diferentes aplicações. Tais como: o açúcar, que é um alimento básico na cesta dos consumidores, e o etanol, biocombustível renovável, comumente utilizado como aditivo à gasolina ou como combustível puro em veículos automotivos. Além disso, a indústria gera outros produtos e subprodutos como biogás, bioeletricidade, levedura, vinhaça e torta de filtro, que também contribuem para a diversificação da matriz energética e a geração de renda (PROPEQ, 2021).

A busca incessante por inovação tecnológica impulsiona a competitividade da indústria sucroalcooleira brasileira. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento visam aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, otimizar os processos industriais e desenvolver novos produtos. A sustentabilidade também é um foco central, com iniciativas para reduzir o consumo de água e energia, minimizar a geração de resíduos e promover a produção de biocombustíveis renováveis (Epifânio, 2023).

Atualmente, Pernambuco abriga pouco menos de 20 usinas sucroalcooleiras em

operação, distribuídas majoritariamente na Mata Norte e na Mata Sul (**Figura 2**), e elas contribuem direta e indiretamente com geração de empregos como também para o desenvolvimento econômico regional. A indústria sucroalcooleira representa uma parcela considerável da economia de do estado, justamente por ser o principal produto da agricultura pernambucana. Além da geração de emprego e renda, essa atividade movimentava outros setores como transporte, comércio e serviços, por isso, estudos tem buscado formas de implementar práticas sustentáveis nesse setor como: geração de energia a partir do bagaço da cana, uso de técnicas de manejo florestal para preservar a Mata Atlântica e programas de reciclagem de água e resíduos (USDA, 2023).

Figura 2. Valores de produção de Cana-de-açúcar no estado de Pernambuco



FONTE: IBGE (2022).

Apesar do cenário positivo, a indústria sucroalcooleira pernambucana enfrenta desafios como a necessidade de modernização tecnológica. Entretanto, o estado apresenta oportunidades na diversificação da matriz de produtos, na produção de biocombustíveis de segunda geração e na expansão do mercado interno de etanol hidratado. A indústria sucroalcooleira brasileira, tanto a nível nacional quanto em Pernambuco, tem um futuro promissor, principalmente se explorado o potencial de expansão da produção, a busca por inovação e o foco na sustentabilidade são fatores que impulsionam o setor.

A indústria sucroalcooleira brasileira, mesmo com: histórico, força econômica e compromisso com a sustentabilidade, ainda tem muito para se desenvolver, em especial Pernambuco. Segundo dados da UNICA, a mecanização da colheita da cana ainda é muito baixa

no estado. Na safra de 2022/23, a colheita manual representou 87,9% de toda a colheita realizada no estado, além disso, ainda se utiliza a queima da cana-de-açúcar como técnica de colheita. Esta prática é altamente prejudicial em diversos aspectos, tanto para o solo quanto para a atmosfera com a emissão de gases tóxicos. Cidades próximas as regiões de plantação de cana, sofrem com essa técnica de colheita, por conta da fumaça e da fuligem liberada no ato dessa queimada. Em Pernambuco, embora a mecanização da colheita apresente benefícios como a redução da mão de obra e dos riscos de acidentes, estudos indicam que ela também pode resultar em perdas significativas da produção, entre 10% e 15%, contra 5% na colheita manual, por conta do terreno irregular (**Figura 3**) onde é realizado o plantio da cana (da Rosa *et al.*, 2009).

Investir em pesquisa e desenvolvimento é fundamental para a competitividade dessa indústria, principalmente quando se desenvolvem tecnologias que aumentam a produtividade, reduzem o impacto ambiental e criam novos produtos que podem vir a aumentar os ganhos dos próprios produtores rurais.

Figura 3. Fotografia de canavial irregular em Pernambuco.



FONTE: CBN (2020).

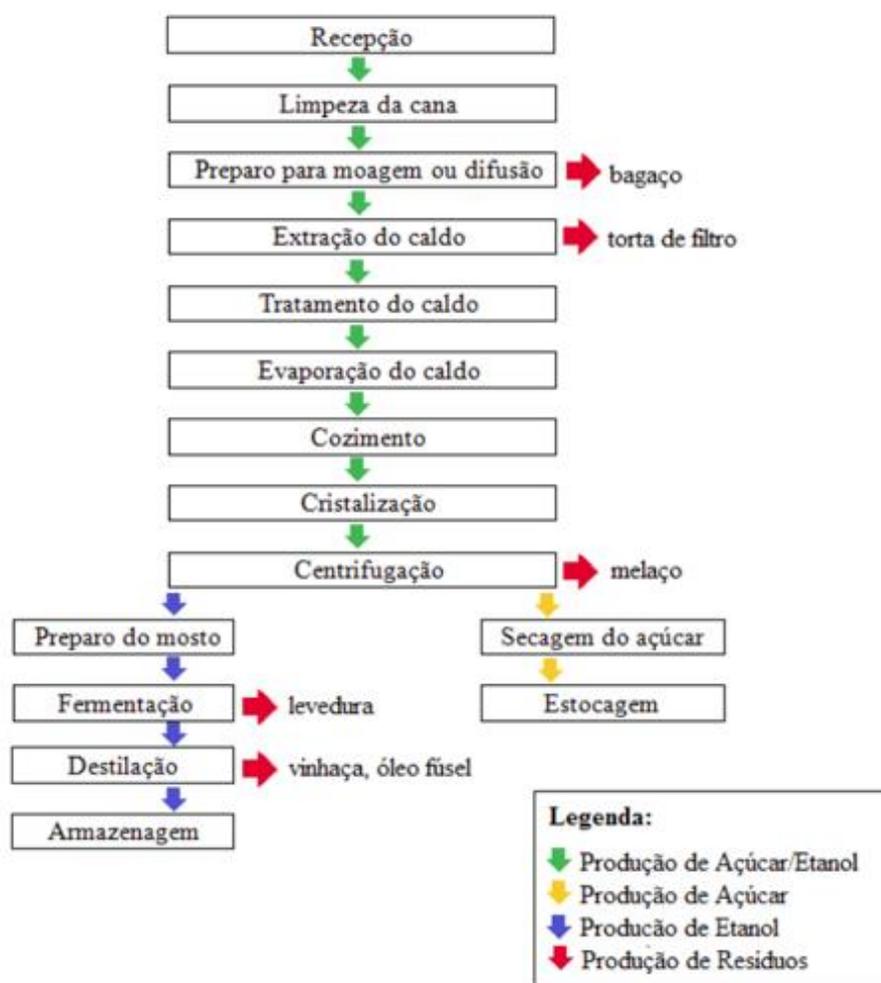
Sendo assim a busca por uma melhora na mecanização da colheita da cana-de-açúcar em Pernambuco é um desafio para garantir a produtividade e a melhoria da produção dessa indústria no estado. Através do investimento em tecnologia, pesquisa e desenvolvimento, capacitação da mão de obra e integração da cadeia produtiva, será possível alcançar uma

produção mais eficiente e sustentável, sem comprometer o meio ambiente e a qualidade de vida da população que é direta ou indiretamente afetada por essa situação.

3.2 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA E SUAS COMPOSIÇÕES

Atrelado ao grande crescimento da produção de cana-de-açúcar, a indústria sucroalcooleira produz também uma grande quantidade de resíduos provenientes dessa produção. Antes de se pensar nos impactos ambientais veementemente, as usinas de cana-de-açúcar eram grandes poluidoras, principalmente devido à queima do bagaço de maneira não-efetiva e ao descarte inadequado de outros resíduos, como vinhoto e torta de filtro. Felizmente, essa realidade mudou drasticamente nas últimas décadas, principalmente através da implementação de práticas mais sustentáveis de manejo dos resíduos, reduzindo significativamente os impactos ambientais. Estes resíduos possuem diversas aplicações, podendo ser usados tanto na própria indústria, auxiliando na produção, como em outros setores como o de geração de energia. Em geral, os resíduos se dividem em: bagaço, torta de filtro e vinhaça, e a sua produção é representada pela **Figura 4**, que representa um fluxograma da colheita à produção de açúcar e etanol.

Figura 4. Fluxograma básico de fabricação de açúcar e etanol.



FONTE: Marcilio Gurgel (2012).

De maneira geral todos os resíduos gerados na produção da cana-de-açúcar possuem prós e contras, mas, se manejados corretamente, os resíduos da indústria canavieira apresentam um grande potencial para geração de energia, produção de biofertilizantes e outros produtos. No entanto, é fundamental que os resíduos sejam gerenciados de forma adequada para evitar impactos ambientais indesejados. Um dos muitos exemplos de uso adequado dos resíduos da indústria canavieira foi o utilizado por Tâmara Gomes *et al.* (2015), onde foram utilizados alguns resíduos como torta de filtro, bagaço e vinhaça como compostores e, esse estudo obteve bons resultados em comparação a outros resíduos da cana irrigado apenas com água. Além disso, alguns tipos de alface utilizados exibiram uma performance produtiva superior quando são cultivados utilizando um composto de resíduos de cana-de-açúcar e irrigados com vinhaça.

3.2.1 Bagaço

O bagaço da cana-de-açúcar é produzido após a passagem da cana na moenda, nesta etapa se separa a fração líquida, o caldo, da fração sólida, como dito, o bagaço. Ele representa cerca de 30% do total da produção da cana possuindo um alto teor de umidade em sua composição (50%). O bagaço seco por sua vez, é constituído majoritariamente por celulose (~50%), que é um polissacarídeo baixa digestibilidade no solo, conferindo rigidez estrutural à planta, seguido de hemicelulose (~30%), que é um polissacarídeo mais amorfo e mais digestível comparado a celulose, e é composto por diversos açúcares simples. Por fim, contém a lignina (~20%), que também confere resistência à planta e também limita a digestibilidade do bagaço. É geralmente utilizado como combustível na queima das caldeiras para geração de energia para além da utilizada na própria indústria (Gurgel, 2012).

Em meados do século XX, sem saber de sua utilidade, o bagaço era descartado ou queimado a céu aberto. Agora, o bagaço (**Figura 5**) é utilizado como biocombustível, substituindo a lenha, para alimentar as caldeiras das usinas. Por conta do seu alto teor de umidade que se transforma em vapor, ele reduz a dependência de combustíveis fósseis como também vem diminuindo significativamente as emissões de gases poluentes. Além dessa utilidade, o bagaço também apresenta diversas outras aplicações como, matéria-prima na produção de papéis e de chapas de construção (Paoliello, 2006).

Figura 5. Fotografia do bagaço seco.



FONTE: Agroceres Mutimix (2021).

Existem problemáticas acerca do bagaço da cana, principalmente atrelado à grande quantidade gerada, como o difícil armazenamento. O seu alto teor de umidade também atrapalha, pois a decomposição ocorre mais rapidamente (Nogueira; Garcia, 2013).

3.2.2 Torta de filtro

A torta de filtro (**Figura 6**), é um subproduto da produção de açúcar e etanol, originada da filtração do caldo de cana após processos de floculação ou decantação. Rica em matéria orgânica e nutrientes, apresenta grande potencial para diversas aplicações, agregando valor ao que antes era considerado um resíduo sem uso atribuído. É gerada em média 40 kg de torta de filtro para cada tonelada de cana (4%), um percentual bem menor se comparada ao bagaço, e tem como sua disposição final a lavoura e/ou compostagem (Nogueira; Garcia, 2013).

Figura 6. Aplicação da torta de filtro no solo com carreta distribuidora de torta de filtro.



FONTE: CanaOnline (2022).

Em termos de constituição, este resíduo é majoritariamente formado por umidade, com um teor de aproximadamente 75%, e aproximadamente 25% de matéria orgânica e uma parcela baixíssima de minerais. A aplicação da torta de filtro na agricultura, quando realizada de forma estratégica e integrada com outras práticas, pode oferecer diversos benefícios para a nutrição vegetal, a saúde do solo por conta de sua composição (Gurgel, 2012).

A torta de filtro vem sendo utilizada não só como provedora de matéria orgânica para o

solo, onde é realizado o plantio das canas, mas também pela sua composição mineral com macro e micronutrientes importantes para o desenvolvimento da planta.

3.2.3 Vinhaça

A vinhaça (**Figura 7**) é um material resultante da produção de álcool, após a fermentação do mosto e a destilação do vinho, e tem um teor que varia de 2 a 6% de parte sólida em sua composição. É um resíduo de pH ácido, e apresenta forte cheiro e coloração escura, e são produzidos, para cada 1 litro de etanol, 18 litros de vinhaça (Gurgel, 2012).

Figura 7. Aplicação de vinhaça no solo.



FONTE: Raízen (2022).

Seu destino mais comum é o lançamento em corpos d'água, o que causa grande desequilíbrio ambiental, como mortandade de peixes e contaminação da água. Aplicação no solo também é, uma prática comum, mas, devido à suas características químicas, como o baixo pH, esta prática sem o devido tratamento da vinhaça, pode ocasionar diversos problemas para o solo, como: acidificação do solo, liberação de maus odores e contaminação de corpos d'água (Agroadvance, 2023).

Dentre os resíduos gerados pelas destilarias de etanol, a vinhaça se destaca como o de maior potencial poluente, representando um dos maiores desafios ambientais dessa indústria, principalmente quando lançada em cursos d'água sem tratamento adequado. A vinhaça possui

uma demanda bioquímica de oxigênio extremamente alta, o que significa que necessita de grande quantidade de oxigênio para se estabilizar. Entretanto, a composição mineral da vinhaça também é rica em nutrientes necessários para o crescimento da cana-de-açúcar, em especial nitrogênio, potássio e fósforo, além de ter um alto teor de matéria orgânica.

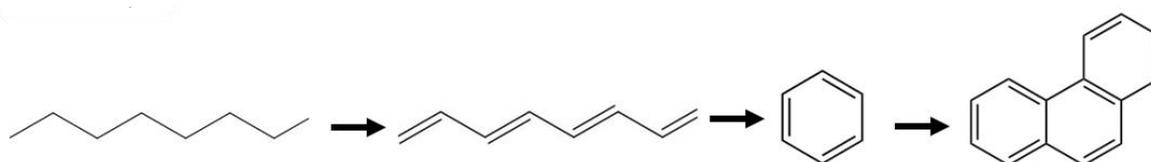
Em síntese, a vinhaça representa um desafio ambiental significativo, embora já existam soluções para mitigar seus impactos. Através do tratamento adequado, reuso e valorização da vinhaça, a indústria de etanol pode mitigar esses fatores e tornar o uso desse resíduo bem mais efetivo.

3.3 MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica (MO) é um componente essencial não só para a agricultura, como para o solo em geral. Esta é composta por uma mistura rica, diversa e complexa de moléculas orgânicas derivadas de restos de plantas, animais e microrganismos, e desempenha um papel fundamental nos ecossistemas, desde a fertilidade do solo até a regulação do clima.

A MO é composta por uma variedade de elementos, incluindo carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e potássio. Sua composição química varia de acordo com sua origem, idade e estado de decomposição da matriz inicial dela. Nesta decomposição, a MO sofre uma transformação passando de cadeias alifáticas para cadeias insaturadas as insaturações ficam alternadas tendenciando uma aromatização dessas cadeias e, por fim, essas cadeias aromáticas se condensam (**Figura 8**). Ela pode ser fracionada em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e húminas, cada uma com suas propriedades e funções específicas (Craswell; Lefroy, 2001).

Figura 8. Representação da transformação da MO



FONTE: O Autor (2024).

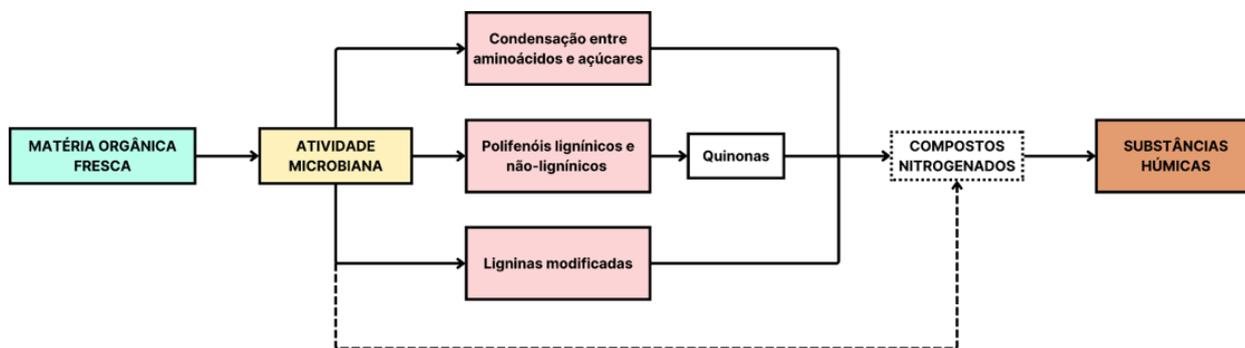
A formação da MO se inicia desde a respiração celular das plantas na fotossíntese, onde ao capturar o CO₂, as plantas o “aprisionam” no tecido vegetal. Após a liberação dos produtos

químicos nas raízes com o desenvolvimento da planta, uma fração desse carbono, antes aprisionado nas folhas, agora se espalha pelo solo, e que, junto com as folhas que são depositadas com o tempo pela planta, vão alimentar a vida microbiana e criar um ambiente rico e fértil. Quando os restos vegetais se depositam no solo, se inicia a decomposição, inicialmente com a fauna do ambiente edáfico, como minhocas e insetos, fragmentando os materiais em partículas menores. Em seguida, os micro-organismos entram em cena, assumindo o papel principal na decomposição (Cunha; Mendes; Giongo, 2015).

Dentre os produtos da decomposição, uma parte se transforma em compostos orgânicos amorfos, complexos e de alto peso molecular, estes compostos, conhecidos como substâncias húmicas, são mais resistentes à decomposição de modo geral, e, a outra parte que é constituída por proteínas, polissacarídeos, ácidos nucleicos, açúcares e aminoácidos, é chamada de substâncias não-húmicas. As substâncias húmicas são compostos orgânicos complexos e heterogêneos resultado da degradação microbiológica e bioquímica de restos vegetais e animais e constituem a fração mais estável da matéria orgânica do solo, com cerca de 85 a 90% da reserva total do carbono orgânico do solo. Formadas a partir da degradação química e biológica, são compostas por uma variedade de moléculas, incluindo ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas, que conferem propriedades únicas, como alta capacidade de retenção de água, melhoria da estrutura do solo e estímulo à atividade microbiana benéfica. Os grupos funcionais carbonila e fenólicos presentes nas substâncias húmicas são fundamentais para suas interações com outros componentes do solo. Esses grupos conferem propriedades tanto hidrofílicas como hidrofóbicas, permitindo que as substâncias húmicas se liguem a íons metálicos e nutrientes, tornando-os disponíveis para as plantas de forma mais abrangente (Santos; Paes, 2016).

As substâncias húmicas nos solos e sedimentos podem ser divididas em três frações principais: ácidos húmicos (HA), ácidos fúlvicos (FA) e a humina (Hum). O HA e FA são extraídos do solo e de outras fontes de fase sólida utilizando uma base forte. Os ácidos húmicos são insolúveis em pH baixo e são precipitados pela adição de ácido forte. Já a humina não pode ser extraída nem em pH básico nem ácido (IHSS, 2007). O esquema descrito na **Figura 9** apresenta as principais vias para a formação das substâncias húmicas, bem como a caracterização por solubilidade das substâncias húmicas.

Figura 9. Esquema de formação das substâncias húmicas.



FONTE: O Autor (2024), adaptado de Nunes (2017).

Os ácidos húmicos e fúlvicos representam a porção solúvel em meio alcalino, de maior reatividade e de maior polaridade. Os ácidos fúlvicos, em particular, destacam-se por sua elevada solubilidade e menor tamanho molecular em comparação com os ácidos húmicos. Devido a essa maior polaridade e menor complexidade molecular, os ácidos fúlvicos têm uma capacidade aumentada de se ligar a íons metálicos e nutrientes essenciais, facilitando sua absorção pelas plantas. Esses compostos orgânicos desempenham um papel significativo na promoção da saúde do solo e na melhoria da fertilidade, atuando como agentes quelantes que ajudam na disponibilização de nutrientes essenciais para as plantas. Além disso, eles também desempenham um papel na formação de agregados do solo, promovendo a estabilidade estrutural e a capacidade de retenção de água e nutrientes (Benites; Madari; Machado, 2003).

3.4 TECNOLOGIAS AMBIENTAIS E A QUÍMICA DOS NOVOS MATERIAIS: ALTERNATIVAS E SOLUÇÕES

As tecnologias ambientais, também conhecidas como tecnologias verdes ou sustentáveis, são uma combinação de ciência e inovação e desempenham um papel essencial na abordagem dos desafios enfrentados pelo meio ambiente devido às atividades humanas. Elas são projetadas para minimizar o impacto humano no meio ambiente, reduzindo a poluição, conservando recursos naturais e promovendo a sustentabilidade com um amplo espectro de ferramentas, processos e abordagens desenvolvidos especialmente para sanar essas problemáticas. Uma definição apropriada para tecnologia ambiental é aquela que não só melhora os processos e produtos, mas também conserva e converte recursos de maneira

sustentável, minimizando os impactos ambientais e evitando a geração de poluentes significativos. Além disso, essas tecnologias são capazes de lidar com os resíduos gerados, seja reduzindo sua quantidade ou tratando-os de forma adequada (Jabbour, 2010).

Atualmente, entre as tecnologias ambientais, aquelas que se destacam são as que convertem matéria orgânica em recursos de maior valor, principalmente pela sua utilização fundamental para o tratamento de resíduos com alternativas viáveis, econômicas e sustentáveis. Com isso, esse tipo de tecnologia vem de encontro a uma das principais problemáticas da indústria sucroalcooleira o manejo dos resíduos gerados, que, como abordado anteriormente, representam um desafio de gestão ambiental por conta da grande quantidade gerada. Dentre essas tecnologias que convertem a matéria orgânica de resíduos se destacam: Compostagem, Vermicompostagem, Biorrefinarias, Pirólise e a Carbonização Hidrotérmica, nos tópicos a seguir serão abordadas algumas características dessas tecnologias, sendo a última o foco principal deste estudo (Nunes; Rezende, 2015).

3.4.1 Compostagem

A compostagem é um processo natural amplamente utilizado para converter resíduos orgânicos, como restos de alimentos e podas de jardim, em adubo rico. Envolve a decomposição biológica controlada desses resíduos em condições aeróbicas, onde microorganismos os decompõem. Com o método adequado, esse resíduo pode melhorar os parâmetros de fertilidade do solo, resultando em um composto nutritivo que aumenta a produtividade das plantações (Nunes; Rezende, 2015).

3.4.2 Vermicompostagem

A vermicompostagem é semelhante à compostagem, mas usa minhocas para decompor resíduos orgânicos, produzindo um composto rico em nutrientes chamado vermicomposto. Os resíduos incluem restos de alimentos vegetais, cascas de frutas, folhas, entre outros materiais biodegradáveis, colocados em um recipiente com minhocas para decomposição. Estudos demonstraram que o vermicomposto impacta positivamente o crescimento das plantas, aumentando a disponibilidade de nutrientes e promovendo a atividade microbiana benéfica no solo. Sua produção orgânica sem produtos químicos sintéticos o torna uma opção segura e sustentável para a fertilização das plantas, contribuindo para a saúde do solo e a produção de alimentos mais saudáveis (Nunes, 2017).

3.4.3 Biorrefinarias

Diferente das refinarias comuns de combustíveis fósseis, as biorrefinarias (**Figura 10**), de acordo com a própria denominação, são as refinarias que utilizam recursos biológicos (biomassa) como matéria-prima. Em países com alta produção de cana-de-açúcar, como o Brasil, medidas significativas têm sido tomadas para explorar o potencial econômico da biomassa. Esses esforços estão alinhados com a crescente tendência global de utilizar fontes renováveis para desenvolver uma química sustentável e impulsionar o uso de biorrefinarias. A utilização eficiente da biomassa residual é um aspecto importante desses esforços, pois permite a produção de biocombustíveis, contribuindo para a redução da dependência dos combustíveis fósseis. Além disso, a intersecção entre bioeconomia e química renovável tem sido explorada como uma abordagem inovadora para maximizar os benefícios do uso da cana-de-açúcar em biorrefinarias (Vaz, 2017).

Figura 10. Fotografia de biorrefinaria de etanol 2G da GranBio.



Fonte: GranBio (2022).

Os biocombustíveis, que são combustíveis derivados da biomassa, são geralmente classificados como de primeira e segunda geração. Os biocombustíveis de primeira geração são

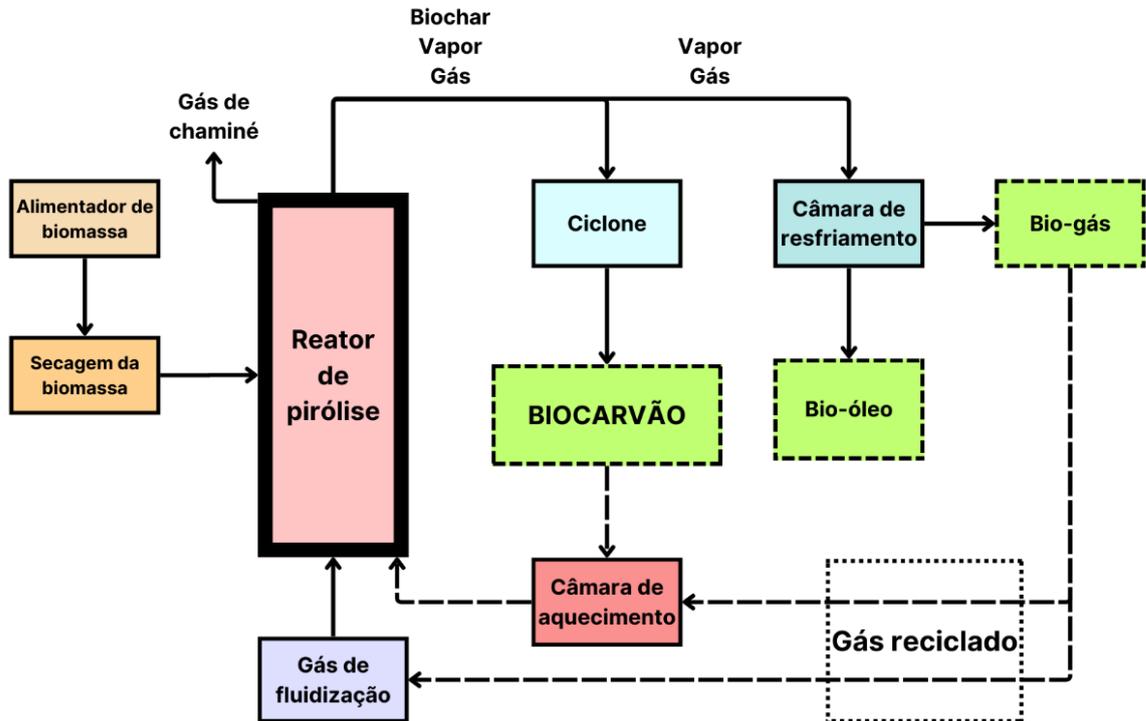
produzidos a partir de matérias-primas que também são usadas como alimentos para humanos e animais, como milho e cana-de-açúcar. Entretanto esse uso tem gerado debates éticos, políticos e ambientais devido à competição com a produção de alimentos e ao impacto sobre o uso da terra. Por isso, na tentativa de mitigar esse problema, tem-se optado pelo uso de biocombustíveis de segunda geração. Os biocombustíveis de segunda geração, por outro lado, são produzidos a partir de resíduos agrícolas, florestais e urbanos, como palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar e madeira residual. Essa alternativa oferece uma solução mais sustentável, pois não compete com a produção de alimentos e contribui para a valorização dos resíduos das indústrias (Rodrigues, 2011).

Entre os produtos gerados pelas biorrefinarias, destacam-se os biocombustíveis, como etanol, biodiesel e biogás, que podem ser utilizados como alternativas aos combustíveis fósseis em setores como transporte e geração de energia. Além disso, as biorrefinarias podem produzir uma variedade de produtos químicos renováveis, como ácidos orgânicos, solventes, polímeros e intermediários químicos, que possuem aplicações em diversas indústrias, incluindo a indústria química, farmacêutica e de materiais. O diretor da GranBio Investimentos S.A, afirmou em 2021 que a produção de etanol do Brasil teria um aumento de cerca de 50%, apenas com o uso da palha da cana-de-açúcar como biomassa para combustíveis de 2ª geração. Em resumo, as biorrefinarias representam uma abordagem inovadora e sustentável para a valorização de biomassa e resíduos orgânicos, transformando-os em uma variedade de produtos de alto valor agregado, incluindo biocombustíveis, produtos químicos, materiais e energia renovável.

3.4.4 Pirólise

O processo de pirólise (**Figura 11**) consiste na decomposição térmica da matéria orgânica na ausência ou na presença de oxigênio bem limitado (baixíssimas concentrações), resultando em 3 produtos, são eles: bio-gás, bio-óleo e o biocarvão (*biochar*, em inglês). A eficiência da pirólise depende de vários fatores, incluindo a temperatura e o tempo de reação, a composição do material de entrada e do sistema de pirólise. Esses parâmetros podem ser ajustados para otimizar a produção dos produtos desejados e minimizar subprodutos indesejados, como emissões gasosas nocivas. Para mitigar ainda mais esses impactos, sugere-se a carbonização dos resíduos da própria indústria para produzir o biocarvão (Al-Wabel *et al.*, 2013).

Figura 11. Esquema do processo de pirólise.



FONTE: O Autor (2024).

O biocarvão (**Figura 12**) é o principal produto formado na pirólise, e, este material possui características favoráveis não só do ponto de vista agrícola, são elas: mitigação do aquecimento global, melhoria da fertilidade do solo e também pode ser utilizado para tratamento de águas residuais (Pereira *et al.*, 2016).

Figura 12. Aplicação de biocarvão no solo.



FONTE: Instituto Terra e Trabalho (2023).

O biocarvão, por ser resistente à decomposição biológica, permanece nos sistemas terrestres por um período significativamente maior do que resíduos vegetais ou compostos, prolongando assim seus efeitos benéficos. O bio-óleo produzido pode ser refinado em biocombustíveis de alta qualidade. Além disso, os gases combustíveis podem ser utilizados para geração de energia, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

Em síntese, a pirólise, quando aplicada aos resíduos da indústria canavieira, como bagaço e palha de cana-de-açúcar, oferece uma solução ambientalmente amigável e economicamente viável para lidar com esses materiais residuais. O bagaço e a palha da cana-de-açúcar são subprodutos abundantes da produção de açúcar e etanol e, são resíduos alto com potencial para gerar produtos valiosos e contribuir para a economia circular. Apesar dos desafios, como o alto custo inicial e as emissões poluentes (se comparada a outras tecnologias), a pirólise é uma tecnologia com grande potencial agrônômico para o manejo dos resíduos agrícolas.

3.5 CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA – HTC

A carbonização hidrotérmica (HTC) é mais uma das tecnologias ambientais com enfoque na conversão da biomassa, geralmente úmida, em materiais orgânicos estáveis com alto teor de carbono. Como citada anteriormente, a HTC é uma tecnologia que se baseia na conversão da matéria orgânica de resíduos agrícolas para a produção de um material com maior valor agregado. A HTC ocorre dentro de um reator onde o resíduo é colocado em meio aquoso, este reator é colocado num invólucro de metal (**Figura 13**) e submetido a uma temperatura moderada (abaixo de 280°C) por um período que varia entre 4 e 12 horas geralmente. (Nunes, 2023)(Bento *et al.*, 2021).

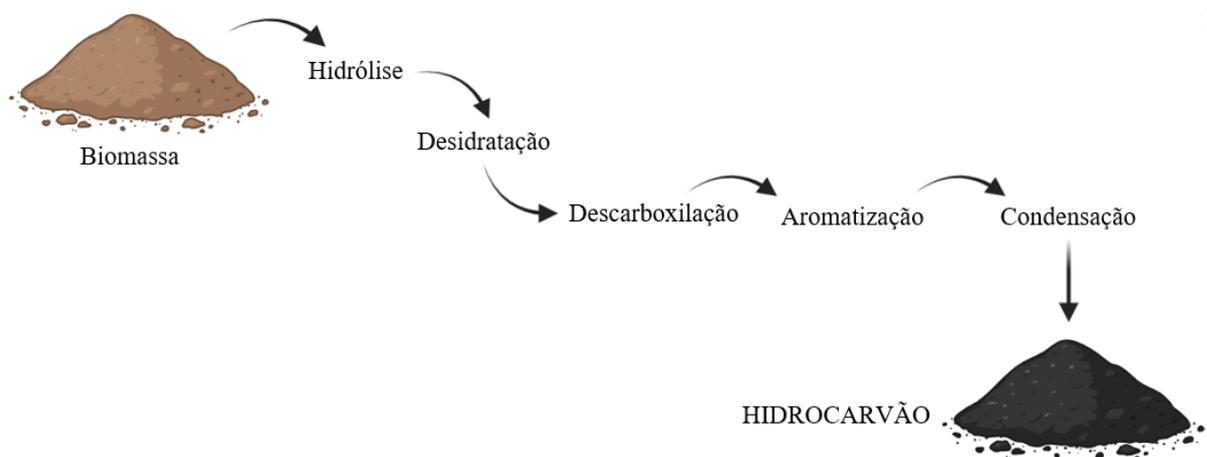
Figura 13. Fotografia do invólucro de metal do reator de HTC



FONTE: O Autor (2024).

A matéria orgânica, na HTC, passa por uma série de reações químicas, incluindo hidrólise (quebrando moléculas complexas em unidades menores como açúcares e aminoácidos), desidratação (removendo a água da biomassa), descarboxilação (liberando CO₂), aromatização (transformando as cadeias alifáticas em aromáticas), e a condensação (combinando moléculas menores para formar compostos mais complexos). Os resultados dessas reações sucessivas culminam na formação do hidrocarvão. Estas reações sucessivas que a biomassa é submetida é representada pelo o esquema da **Figura 14** (Nunes, 2023)(Bento *et al.*, 2021).

Figura 14. Esquema de reações dentro do reator



FONTE: O Autor (2024).

Uma das formas de produzir hidrocarvões de bagaço de cana-de-açúcar, via HTC, de maneira geral, pode ser descrita pelo seguinte esquema ilustrado nas **figuras 15 a 19** e descrito seguindo os tópicos a seguir (Wang *et al.*, 2018):

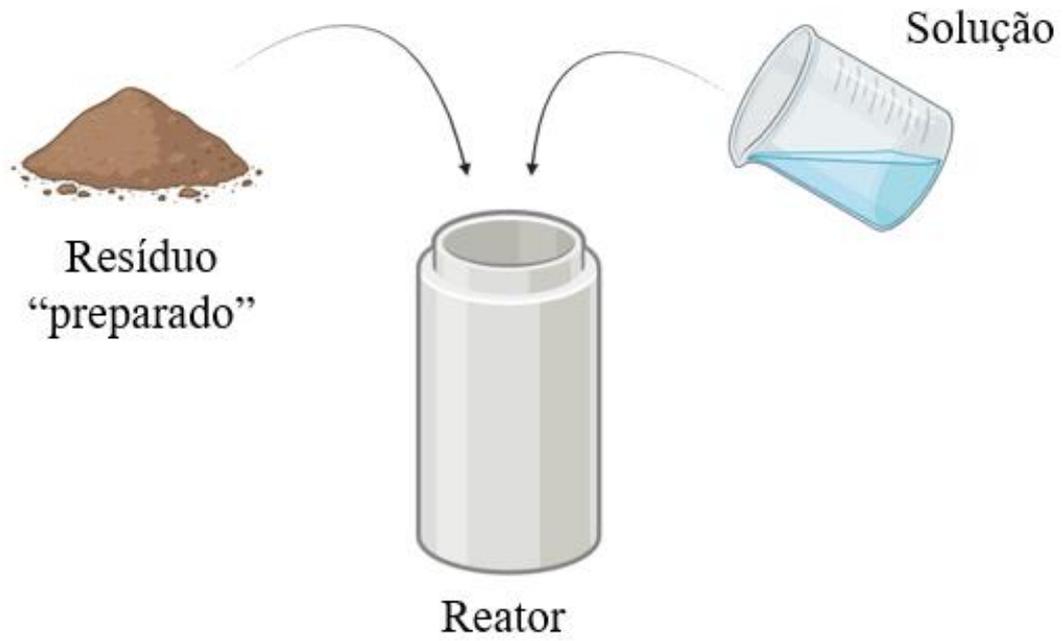
- i. A cana-de-açúcar é colhida, limpa, moída e peneirada (**Figura 15**);
- ii. A biomassa é colocada no reator juntamente com uma solução aquosa determinada pelo pesquisador, podendo ser ácida, alcalina ou até água (**Figura 16**);
- iii. O reator, em seguida é tampado, colocado em um invólucro metálico onde ficará confinado durante o processo da HTC (**Figura 17**);
- iv. A pós vedar o invólucro, o sistema de reação é colocado num forno, onde será submetido ao tempo e à uma temperatura escolhida previamente pelo operador (**Figura 18**);
- v. Ao fim do tempo reacional, são retiradas as fases sólida e líquida (**Figura 19**).

Figura 15. Representação da cana-de-açúcar pré e pós preparo de amostra.



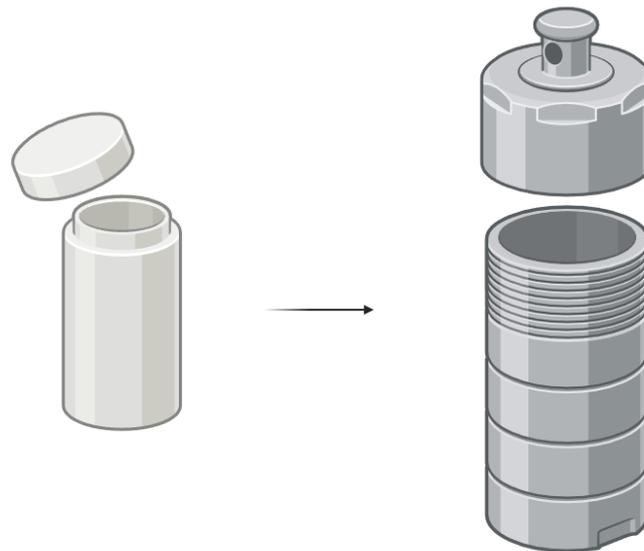
FONTE: O Autor (2024).

Figura 16. Representação dos materiais sendo colocados no reator.



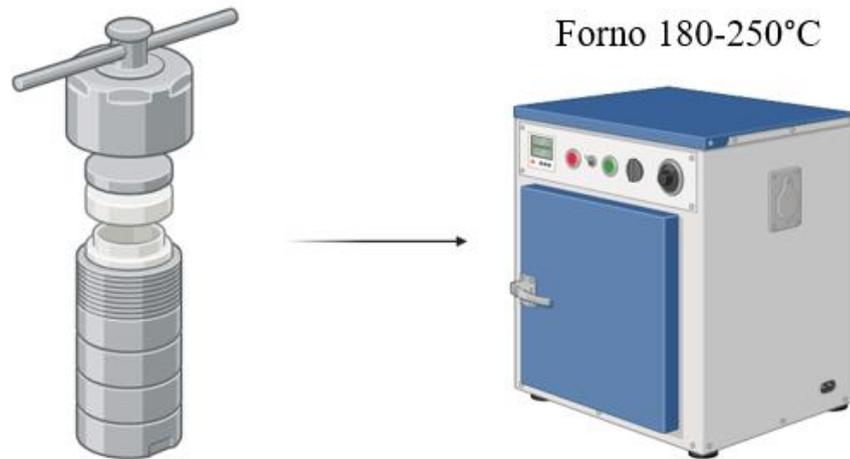
FONTE: O Autor (2024).

Figura 17. Representação do reator e do invólucro de metal.



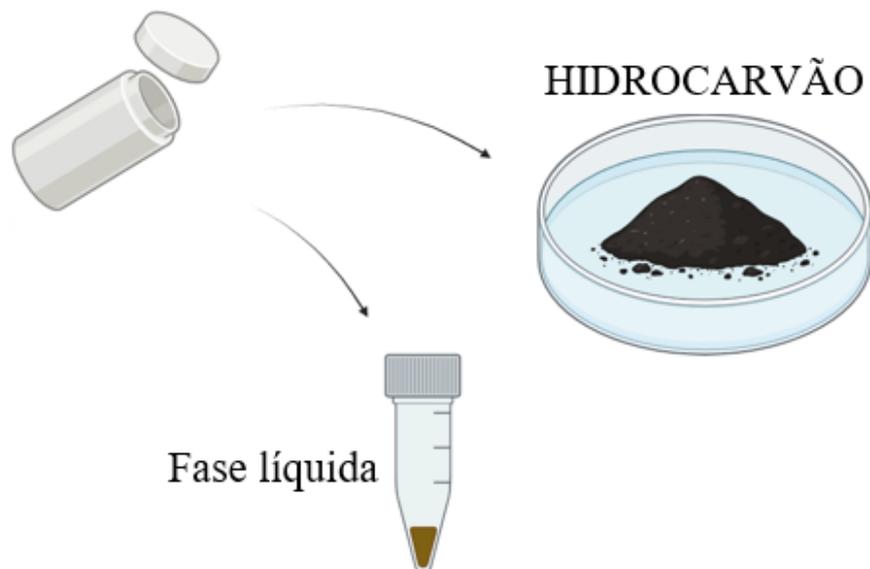
FONTE: O Autor (2024).

Figura 18. Representação do reator, dentro do invólucro, e do forno.



FONTE: O Autor (2024).

Figura 19. Representação das frações do hidrocarvão.



Fonte: O Autor (2024).

Uma das principais vantagens da HTC em relação a outros processos termoquímicos é que não é necessário processo de secagem prévio, além de possuir elevados rendimentos da fração sólida, com uma alta qualidade do produto sintetizado. A facilidade de operação, baixo custo e eficiência energética do processo, tornam essa tecnologia ainda mais viável. Além dessa vantagem de ter um processo a menos na sua realização, a HTC também se destaca das outras tecnologias, já que as demais podem envolver o uso de produtos químicos nocivos e/ou não sustentáveis como também gerar resíduos indesejáveis (mesmo que na sua concepção essas outras tecnologias utilizem um resíduo como matéria-prima). A HTC se apresenta, também, como uma alternativa de converter os resíduos da indústria canavieira que, antes, sem tratamento poderiam promover a contaminação solo, ou causar algum tipo de desequilíbrio para o meio ambiente (Román *et al.*, 2018).

A qualidade e o rendimento do hidrocarvão formado depende diretamente de vários parâmetros, dentre eles, a temperatura, o tempo reacional e a composição da matéria orgânica utilizada na produção. Tomando como base apenas o parâmetro temperatura, observa-se que, conforme a temperatura de reação aumenta, há uma diminuição nos rendimentos sólidos. Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento da hidrólise e desidratação da matéria-prima, que são intensificadas com o aumento da temperatura de reação. Além disso, a elevação da temperatura também potencializa a volatilização e dissolução de compostos. Essa observação está em consonância com estudos que indicam a influência da temperatura no teor de carbono na fase líquida. Temperaturas de reação mais altas levam a uma maior solubilização inicial da matéria-prima. Como resultado, verifica-se uma redução no teor de carbono na fase sólida. Portanto, a temperatura de reação desempenha um papel crucial na determinação do rendimento e da composição do produto final. Em relação ao parâmetro tempo, existe também uma variação do hidrocarvão obtido, porém ele depende significativamente da quantidade de matéria orgânica (resíduo) que é adicionado ao reator. Contudo, o parâmetro tempo só vai ter influência no material formado até que esteja completa conversão da matéria orgânica (Román *et al.*, 2018).

Embora a integração da HTC nas lavouras de cana-de-açúcar apresente inúmeras vantagens, também há desafios a serem superados. Um dos desafios é a implementação eficiente da HTC para o agricultor. Para isso, é necessário desenvolver processos e infraestrutura adequados para a produção em larga escala de hidrocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar, principalmente por conta da questão do tempo reacional e do maquinário necessário para a realização desta tecnologia. Além disso, é importante garantir que o processo seja economicamente viável para o produtor rural (Epifânio, 2023).

Os estudos analisados variam não só os parâmetros reacionais como também a matéria-prima utilizada para o preparo de hidrocarvões via HTC. Dentre os materiais estudados destacam-se os estudos apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1. Parâmetros experimentais utilizados na HTC dos estudos pesquisados.

AUTOR/ AUTORES	MATÉRIA- PRIMA	T (°C)	t (min)	η (%)
(Congsomjit; Areprasert, 2021)	Bagaço de cana	180; 200; 220; 240	30; 60; 90	De 180 a 200°C = 34-41% De 220 a 240°C = 26-37%
(Dos Santos <i>et al.</i> , 2022)	Bagaço de cana	230 ± 10	780 (13h)	Rendimento médio = 23,95%
(Bento <i>et al.</i> , 2021)	Bagaço e vinhaça	232	780 (13h)	44% para o HC de bagaço 20% para o HC de bagaço + vinhaça 12% para o HC de vinhaça
(Hoekman <i>et al.</i> , 2013)	Bagaço de cana	175; 215; 235; 255; 275; 295	30	Em ordem com o aumento da temperatura: 69,63; 63,77; 59,09; 45,01; 44,57 e 42,75
(Pacheco, Antero <i>et al.</i> , 2019)	Cascas do fruto de <i>Magonia pubescens A. St. Hil. Sapindaceae</i>	170; 180; 190	300 (5h)	Para 170°C = 46,25% Para 190°C = 27,43%

FONTE: O autor, 2024.

Os dados da **Tabela 1** mostram que ao aumentar a temperatura e/ou o tempo reacional, ocorre uma diminuição geral do rendimento do HC. Essa redução de fase sólida é ocasionada pela geração de subprodutos líquidos e gasosos, sobretudo pela quebra da hemicelulose. A elevação da temperatura tende a intensificar o processo de quebra e solubilização biomassa da matéria-prima pelas reações hidrotérmicas, levando a um baixo rendimento sólido final. Nesse sentido, com o aumento da temperatura a dissolução de compostos orgânicos da biomassa é potencializada, devido ao incremento da decomposição da estrutura da lignina e da celulose durante a HTC (Antero *et al.*, 2019) (Hoekman *et al.*, 2013) (Congsomjit; Areeprasert, 2021).

O estudo de Antero *et al.* (2019) mostra que essa queda de rendimento referente a variações de temperatura não ocorre apenas com a HTC de resíduos de indústria canavieira, mas sim com HTC em geral. Já no caso de Dos Santos *et al.* (2022), foram utilizados aditivos químicos (ácidos) para a produção de um hidrocarvão ativado, para utilizá-los como combustível. Para Bento *et al.* (2021), os rendimentos foram distintos justamente por conta da biomassa utilizada em cada HC produzido, já que o bagaço, é uma matéria-prima menos úmida que a vinhaça que retém parte do carbono dissolvidas ou suspensas na água do processo.

Analisando outros materiais o realizado por Khan *et al.* (2021) indicou que as matérias-primas que foram submetidas a HTC, tiveram seu rendimento variado por alguns fatores, foram eles: temperatura, tempo de reação, proporção água-biomassa, pH e catalisadores. Note que estes fatores que também influenciaram nos rendimentos dos trabalhos já citados. Também foi descrito por Khan *et al.* que temperaturas entre 180 e 220°C geralmente resultam rendimentos maiores, independentemente da categoria da matéria-prima utilizada.

3.6 HIDROCARVÃO (HC)

O hidrocarvão (**Figura 20**) é o produto principal da HTC, sendo um composto sólido carbonáceo formado por diversos grupos funcionais polares. Estes grupos estão presentes na superfície do HC e melhoram a afinidade com alguns adsorbatos do solo. O HC é constituído majoritariamente de carbono, o hidrocarvão apresenta uma variedade de utilidades atreladas não só a agricultura (Pauline; Joseph, 2020).

Figura 20. Hidrocarvão produzido em laboratório.



FONTE: O Autor (2024).

Sobre as possíveis utilidades do hidrocarvão, Román *et al.* (2018), citam que, com base na estrutura porosa, o HC apresenta capacidade de adsorção de contaminantes, retenção de água e condutividade elétrica. Essa propriedade de condutividade elétrica, faz com que o hidrocarvão esteja sendo estudado para ser um material constituinte de supercapacitores e baterias por exemplo.

O estudo de Wang *et al.* (2018), demonstra que alguns fatores são importantes para a variação da qualidade e do rendimento do hidrocarvão, com destaque para a temperatura e o tempo de reação. Além disso, alguns fatores não só aumentam como também diminuem algumas características do HC. Estes fatores (temperatura e tempo), quando aumentados, diminuem o rendimento do HC ao fim da HTC, entretanto, aumentam a área de superfície de adsorção, bem como a porosidade do HC.

Além de ter uma gama de possibilidades de utilização na indústria, como insumo agrícola, o HC tem ganhado destaque por conta de uma característica, que é a presença dos pontos de carbono (CD, do inglês *carbon dots*), em sua composição, já que essas os CDs

possuem propriedades ópticas únicas. Os CDs surgem como nanomateriais promissores para o uso em sistemas agrícolas mais sustentáveis. Em geral, podem ser produzidos de maneira simples e de baixo custo, além de apresentar baixa toxicidade, biocompatibilidade e propriedades fotoluminescentes. Estas propriedades podem melhorar a captação de radiação ultravioleta pela planta, aumentando o seu fluxo energético e, conseqüentemente, seu desenvolvimento e produtividade (LeCroy *et al.*, 2014).

3.7 HIDROCARVÃO VS. BIOCÁRVÃO

As diferenças entre o hidrocarvão e o biocarvão são várias, desde a forma de produção, HTC para o hidrocarvão e pirólise para o biocarvão, até a questões de aplicação do material no solo. Diferente da HTC que é realizada em temperaturas brandas (180-200°C), o processo de pirólise lenta é realizado em altas temperaturas (600-700°C), e isso pode apresentar um risco caso essa tecnologia seja levada para agricultores sem a devida orientação. Ainda discorrendo sobre o processo de formação destas matérias, a HTC é uma tecnologia considerada mais limpa que a pirólise, principalmente por não emitir gases indesejados na atmosfera, fato que ocorre no processo de pirólise (Kloss *et al.*, 2012).

O biocarvão apresenta desafios quando utilizado na agricultura. Como é comumente utilizado em grandes quantidades, seria praticamente impossível e impraticável de removê-lo do solo caso houvesse alguma consequência negativa do ponto de vista da toxicidade agrícola e ambiental. Há também o risco de combustão espontânea ou de explosões de poeiras na presença de fogo aberto. Esta problemática, relativa à agricultura, não tem a mesma intensidade quando se substitui o biocarvão pelo hidrocarvão, já que as pequenas partículas do hidrocarvão aglomeram-se e misturam-se no solo, reduzindo assim o risco de explosão e de perda por erosão. Algumas das principais características de divergência entre o hidrocarvão e o biocarvão são apresentadas na **Figura 21** (Kambo; Dutta, 2015).

Figura 21. Esquema das diferenças entre hidrocarvão e o biocarvão.



FONTE: O Autor (2024).

O estudo de Kambo e Dutta (2015) mostra que o hidrocarvão e o biocarvão diferem também em suas características estruturais e composição química resultantes dos processos de produção. O HC é mais ácido em comparação com o biocarvão, isso se deve à presença de mais grupos funcionais oxigenados em sua composição. Por outro lado, o biocarvão tende a ser alcalino devido à perda de grupos carboxila e hidroxila durante a pirólise. Além disso, o pH alcalino do biocarvão é atribuído à presença de compostos inorgânicos e metálicos, como cálcio e magnésio. Durante o processo da HTC parte desses compostos inorgânicos é “lavada” para o meio aquoso, resultando na diminuição do pH do HC. O biocarvão, além de ter uma coloração mais escura em comparação ao hidrocarvão, possui uma estrutura composta por camadas semelhantes a grafite, com espaçamento entre elas aumentando com a temperatura de reação. Em contraste, o hidrocarvão, produzido pelo processo HTC, apresenta nanopartículas carbonosas de forma esférica na superfície. Ainda sobre diferenças estruturais, o biocarvão é composto majoritariamente por grupos aromáticos, em contraste o hidrocarvão, é preponderantemente formado por grupos alquílicos. Tais variações na composição e estrutura afetam diretamente as propriedades físico-químicas e a capacidade de utilização desses materiais. Ainda nesse estudo, os pesquisadores apontam que, de maneira geral, o hidrocarvão tem um rendimento maior se comparado ao biocarvão, entretanto, esse rendimento é variável para cada tipo de biomassa utilizada e das condições reacionais.

Dentre as mais diversas diferenças apontadas sobre o preparo do hidrocarvão

comparado ao do biocarvão, um dos mais importantes, principalmente por conta da questão de otimizar os processos, é que biomassa empregada no processo de HTC requer menos etapas de preparação em comparação com métodos tradicionais, como a pirólise. Conforme apontado por Segundo Bridgwater (2012), o material inicial para a pirólise deve ter um conteúdo de umidade abaixo de 10%. No entanto, no caso da HTC, essa fase de pré-secagem é dispensável.

4 CONCLUSÃO

A HTC é uma tecnologia de conversão da matéria orgânica, que se mostra como uma alternativa viável para a gestão dos resíduos agrícolas, em especial da indústria sucroalcooleira, uma vez que a biomassa desses resíduos apresenta um elevado teor de MO. E como apresentado durante este trabalho, comparada a outras tecnologias, a HTC é mais eficaz, segura e gera menos subprodutos indesejados conforme sua utilização.

O produto da HTC, o hidrocarvão, também é de suma importância para a prática agrícola podendo ser usado de diversas formas, desde aplicação direta no solo, assim como na superfície foliar. O uso do HC também pode vir a ser útil em outras práticas de sustentabilidade ambiental, como adsorção de contaminantes, adsorção de nutrientes quando aplicado no solo, como também utilizado para melhorar o desenvolvimento de plantas.

Como visto no estudo, o percentual de colheita manual em Pernambuco ainda é maior comparado ao de mecanização, o que indica uma urgente necessidade de uma modernização das práticas agrícolas no nosso estado.

Em síntese, a valorização da MO por meio da HTC atende às demandas ambientais de gestão de resíduos e, também, é promissora para o avanço de práticas agrícolas sustentáveis, inovadoras e economicamente viáveis, visando um aumento da economia circular, onde se aplica um subproduto na própria produção, bem como melhorando a qualidade de vida no campo.

REFERÊNCIAS

AGROADVANCE. *In*: 2023. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-vinhaca-de-residuo-a-recurso/>. Acesso em: 15 fev. 2024.

AL-WABEL, M. I. *et al.* Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 131, p. 374–379, 2013.

ARPIA, A. A. *et al.* Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 403, p. 126233, 2021.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 61, n. suppl, p. 856–881, 2014.

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. de A. Extração e Fracionamento Quantitativo de Substâncias Húmicas do Solo: um Procedimento Simplificado de Baixo Custo. [s. l.], 2003.

BENTO, L. R. *et al.* Hydrochar obtained with by-products from the sugarcane industry: Molecular features and effects of extracts on maize seed germination. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 281, p. 111878, 2021.

BRIDGWATER, A. V. **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading - ScienceDirect**. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411000638>. Acesso em: 20 fev. 2024.

Canilha, L. CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR IN NATURA, EXTRAÍDO COM ETANOL OU CICLOHEXANO/ETANOL. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos/11/11-570-713.htm>. Acesso em: 18 fev. 2024.

CONAB - SAFRA 2023/24, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5295-producao-de-cana-de-acucar-cresce-10-9-estimada-em-677-6-milhoes-de-toneladas-na-safra-2023-24>. Acesso em: 13 fev. 2024.

CONAB - SAFRA BRASILEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 13 fev. 2024.

CONGSOJIT, D.; AREEPRASERT, C. Hydrochar-derived activated carbon from sugar cane bagasse employing hydrothermal carbonization and steam activation for syrup decolorization. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 11, 2021.

CRASWELL, E. T.; LEFROY, R. D. B. The role and function of organic matter in tropical soils. *In*: MARTIUS, C.; TIESSEN, H.; VLEK, P. L. G. (org.). **Managing Organic Matter in Tropical Soils: Scope and Limitations**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. p. 7–18. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-2172-1_2. Acesso em: 15 fev. 2024.

CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. **Matéria orgânica do solo**. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1034986>. Acesso em: 17 fev. 2024.

DA ROSA, E. J. *et al.* **Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colheita mecanizada**. [s. l.], 2009. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2009/wp-content/uploads/sites/77/2016/07/jefferson_vieira_jose3.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

DOS SANTOS, J. V. *et al.* Hydrothermal carbonization of sugarcane industry by-products and process water reuse: structural, morphological, and fuel properties of hydrochars. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 153–161, 2022.

EPIFÂNIO, H. R. A importância da produção de açúcar no Brasil: revisão sobre os aspectos sócio-econômicos-ambientais do processo produtivo do açúcar no Brasil. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/18133>. Acesso em: 22 fev. 2024.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=dRuzRyEIzmkC&oi=fnd&pg=PA9&dq=GERHARDT%3B+SILVEIRA,+2009%3B&ots=94OeYYioGJ&sig=f8AO0Cjy1CsGJYB_bGFPJvo22xI. Acesso em: 20 fev. 2024.

GOMES, T. C. de A. *et al.* **Compostos Orgânicos de Resíduos da Agroindústria Canavieira na Produção e Estado Nutricional de Cultivares de Alface**. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1039858/compostos-organicos-de-residuos-da-agroindustria-canavieira-na-producao-e-estado-nutricional-de-cultivares-de-alface>. Acesso em: 19 fev. 2024.

GRANBIO | INOVAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL. Disponível em: <http://www.granbio.com.br/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

HOEKMAN, S. K. *et al.* Hydrothermal carbonization (HTC) of selected woody and herbaceous biomass feedstocks. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 113–126, 2013.

IBGE. **Produção de Cana-de-açúcar no Brasil | IBGE**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em: 13 fev. 2024.

Instituto de Economia Agrícola. Alta na Produção e nas Exportações de Açúcar Marca a Safra 2020/21 de Cana. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>. Acesso em: 14 fev. 2024.

International Humic Substances Society. O que são substâncias húmicas | IHSS. *In*: 2007. Disponível em: <https://humic-substances.org/what-are-humic-substances-2/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

JABBOUR, C. J. C. Tecnologias ambientais: em busca de um significado. **Revista de Administração Pública**, [s. l.], v. 44, p. 591–611, 2010.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable**

Energy Reviews, [s. l.], v. 45, p. 359–378, 2015a.

KHAN, N.; MOHAN, S.; DINESHA, P. Regimes of hydrochar yield from hydrothermal degradation of various lignocellulosic biomass: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 288, p. 125629, 2021.

KLOSS, S. *et al.* Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 990–1000, 2012.

LARANJA, M. J. *et al.* Semivolatile organic compounds in the products from hydrothermal carbonisation of sugar cane bagasse and vinasse by gas chromatography-mass spectrometry. **Bioresource Technology Reports**, [s. l.], v. 12, p. 100594, 2020.

LECROY, G. E. *et al.* Toward Structurally Defined Carbon Dots as Ultracompact Fluorescent Probes. **ACS Nano**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 4522–4529, 2014.

MENEZES, C. C. N.; DOS SANTOS, S. M.; BORTOLI, R. de. Mapeamento de Tecnologias Ambientais: Um Estudo sobre Patentes Verdes no Brasil. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade: GeAS**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 110–127, 2016.

MOURA LIMA, L. C. *et al.* Práticas de manejo e conservação do solo: percepção de agricultores da Região Semiárida pernambucana. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 148–153, 2016.

NAIDOO, K. *et al.* Boosting Our Soil With Green Technology: Conversion of Organic Waste Into “Black Gold”. In: **FOOD BIOCONVERSION**. [S. l.]: Elsevier, 2017. p. 491–510. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128114131000152>. Acesso em: 19 fev. 2024.

NOGUEIRA A. G, M. **Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado**. 2012. Doutor em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=464300>. Acesso em: 15 fev. 2024.

NOGUEIRA, M. A. F. de S.; GARCIA, M. da S. gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de rio brilhante, Mato Grosso do Sul. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s. l.], p. 3275–3283, 2013.

NUNES, R. R. **Tecnologias Ambientais**. São Carlos, SP: Cubo Multimídia Ltda Me, 2023.

NUNES, R. R. **Vermicompostagem como tecnologia aplicada à valorização e reaproveitamento dos resíduos de curtume: um estudo químico e agrônômico com vistas à produção orgânica de pimentão em ambiente protegido**. 2017. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042017-085528/en.php>. Acesso em: 22 fev. 2024.

NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. de O. Recurso solo: propriedades e usos. [s. l.], 2015.

Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002739249>. Acesso em: 18 fev. 2024.

PACHECO ANTERO, R. V. *et al.* Obtenção de hydrochar a partir de carbonização hidrotérmica de cascas do fruto de *Magonia pubescens* A. St. Hil. Sapindaceae: caracterização e avaliação em processo de adsorção. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://oulurepo.oulu.fi/handle/10024/25093>. Acesso em: 21 fev. 2024.

PAULINE, A. L.; JOSEPH, K. Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters. **Fuel**, [s. l.], v. 279, p. 118472, 2020.

PEREIRA, L. L. *et al.* Produção de biochar a partir da pirólise de resíduos agroindustriais. **Anais do VIII SIMPROD**, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/7658>. Acesso em: 19 fev. 2024.

PEREIRA, I. Z. *et al.* Uma breve revisão sobre a indústria sucroalcooleira no Brasil com enfoque no potencial de geração de energia. **Revista Brasileira de Energia—Vol**, [s. l.], v. 25, n. 2, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ivan-Santos-2/publication/343693255_Uma_breve_revisao_sobre_a_industria_sucroalcooleiro_Brasil_com_enfoque_no_potencial_de_geracao_de_energia/links/5f720b6a458515b7cf54f7ed/Uma-breve-revisao-sobre-a-industria-sucroalcooleiro-Brasil-com-enfoque-no-potencial-de-geracao-de-energia.pdf. Acesso em: 22 fev. 2024.

PORTAL EMBRAPA. Dinâmica da produção canavieira brasileira nos últimos 30 anos, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/56125640/publicacao-mostra-a-dinamica-da-producao-canavieira-brasileira-nos-ultimos-30-anos>. Acesso em: 15 fev. 2024.

PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO | IBGE. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/pe>. Acesso em: 14 fev. 2024.

PROPEQ. **Venha conhecer a Indústria Sucroalcooleira e suas aplicações!** *In*: PROPEQ. 13 jul. 2021. Disponível em: <https://propeq.com/industria-sucroalcooleira-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 22 fev. 2024.

REIS, G. N. dos [UNESP. Perdas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua em função do desgaste das facas do corte de base. [s. l.], 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/100846>. Acesso em: 14 fev. 2024.

REVISTA CULTIVAR. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/tem-inicio-pesquisa-sobre-producao-de-cana-em-pernambuco>. Acesso em: 14 fev. 2024.

RODRIGUES, J. A. R. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, [s. l.], v. 34, n. 7, p. 1242–1254, 2011.

ROMÁN, S. *et al.* Hydrothermal Carbonization: Modeling, Final Properties Design and Applications: A Review. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 216, 2018.

SANTOS, T.; PAES, L. Substâncias húmicas: um breve relato sobre sua importância e suas interações. **Revista Educação Pública**, [s. l.], v. 16, n. 13, 2016. Disponível em: <https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/16/13/substancias-hmicas-um-breve-relato-sobre-sua-importancia-e-suas-interaes>. Acesso em: 17 fev. 2024.

SBPE - SOCIEDADE BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO | REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIA. [s. l.], Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/45>. Acesso em: 15 fev. 2024.

SOMORIN, T. *et al.* Sustainable valorisation of agri-food waste from open-air markets in Kampala, Uganda via standalone and integrated waste conversion technologies. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 172, p. 106752, 2023.

UNICA - AÇÚCAR. *In*: UNICA. 2022. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/acucar/>. Acesso em: 14 fev. 2024.

USDA. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/z029p472x?locale=en>. Acesso em: 15 fev. 2024.

VAZ, S. Sugarcane-Biorefinery. *In*: WAGEMANN, K.; TIPPKÖTTER, N. (org.). **Biorefineries**. Cham: Springer International Publishing, 2017. (Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology). v. 166, p. 125–136. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/10_2016_70. Acesso em: 19 fev. 2024.

WANG, T. *et al.* A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 90, p. 223–247, 2018.