

ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL PROF. ARMANDO JOSÉ FARINAZZO
CENTRO PAULA SOUZA

Enzo Ferreira Olimpio
Flavia Vitória Garcia Lima
Guilherme dos Santos Paschoalini
Murilo Viana

PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR E SEUS IMPACTOS NO SOLO

Fernandópolis
2025

Enzo Ferreira Olimpio
Flavia Vitória Garcia Lima
Guilherme dos Santos Paschoalini
Murilo Viana

PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE AÇÚCAR E SEUS IMPACTOS NO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção da Habilitação Profissional
Técnica de Nível Médio de Técnico em
Açúcar e Álcool, no Eixo Tecnológico de
Produção Industrial, à Escola Técnica
Estadual Professor Armando José
Farinazzo, sob orientação da Professora
Tamires Cavalcante Francisco

Examinadores:

Tamires Cavalcante Francisco

Joel Gouveia Baptista

Gislaine Aparecida Lucatte Viana

Fernandópolis
2025

PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS IMPACTOS NO SOLO

Enzo Ferreira Olimpio
Flavia Vitória Garcia Lima
Guilherme dos Santos Paschoalini
Murilo Viana

RESUMO: Nos dias atuais, o reaproveitamento de resíduos agroindustriais tem apresentado um crescimento exponencial. No Brasil, a indústria sucroalcooleira é caracterizada com um dos potenciais fornecedores de biomassa, subproduto amplamente disponível em função da alta produção de açúcar e álcool no país. Considerando-se o potencial dos macronutrientes presentes nesses resíduos, o biochar surge como alternativa sustentável para o condicionamento do solo, sendo definido como material rico em carbono obtido da pirólise de biomassa em condições de baixa disponibilidade de oxigênio. Assim, este trabalho tem como objetivo produzir biochar a partir do bagaço de cana-de-açúcar e avaliar suas características físico-químicas, com foco na melhoria da qualidade do solo e na mitigação de impactos ambientais. O desenvolvimento e a otimização do processo de pirólise constituem, portanto, não apenas um avanço tecnológico, mas também uma estratégia alinhada aos desafios contemporâneos de sustentabilidade, segurança energética e gestão de resíduos agroindustriais.

Palavras-chave: Biochar; Bagaço da cana-de-açúcar; Pirolase; Sustentabilidade.

ABSTRACT: In recent years, the reuse of agro-industrial residues has shown exponential growth. In Brazil, the sugar-energy industry is recognized as a major potential source of biomass, a widely available by-product resulting from the country's high sugar and ethanol production. Considering the macronutrient potential present in these residues, biochar emerges as a sustainable alternative for soil conditioning, defined as a carbon-rich material obtained from the pyrolysis of biomass under low-oxygen conditions. Therefore, this study aims to produce biochar from sugarcane bagasse and to evaluate its physicochemical characteristics, focusing on soil quality improvement and the mitigation of environmental impacts. The development and optimization of the pyrolysis process represent not only a relevant technological advancement but also a strategic response to contemporary challenges related to sustainability, energy security, and agro-industrial waste management.

Keywords: Biochar; Sugarcane bagasse; Pyrolysis; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a demanda de reaproveitamento de resíduos agroindustriais tem crescido exponencialmente, visto que a conscientização ambiental sobre mudanças climáticas tem se tornado algo essencial em consequência da grande emissão de gases poluentes na atmosfera.

No Brasil, o setor sucroalcooleiro, além de ser uma das bases da economia agrônoma, se mostra um potencial fornecedor de biomassa, especialmente o bagaço de cana-de-açúcar, subproduto amplamente disponível em serventia da elevada produção nacional de açúcar e etanol no país (UNICA, 2018; BENTIVOGLIO; FINCO; BACCHI, 2016).

Os macronutrientes são elementos minerais que podem ser subdivididos em dois grupos: primários e secundários, sendo os primários, absorvidos pelas plantas em maiores quantidades que os secundários (Barros, 2020), sendo os principais macronutrientes: K, Mg e Ca. A partir disso, o biochar, que é definido como “qualquer material rico em carbono obtido de biomassa carbonizada sob baixa atmosfera de oxigênio, para uso como condicionador de solos” (Maia, 2010, p.18) pode ser uma alternativa sustentável que utiliza resíduos agroindustriais, nesse caso, o bagaço da cana-de-açúcar como matéria prima da produção.

Desse modo, o objetivo do presente trabalho é a produção do biochar, que contém o bagaço da cana-de-açúcar, visando avaliar suas características físico-químicas, especialmente na melhoria do solo e na mitigação de impactos ambientais.

Sendo assim, o desenvolvimento e a otimização de processos de pirólise para a produção de biochar a partir do bagaço de cana não apenas representam um avanço tecnológico relevante, mas também uma resposta estratégica aos desafios contemporâneos de sustentabilidade ambiental, segurança energética e gestão de resíduos agroindustriais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR: CARACTERÍSTICAS E USOS

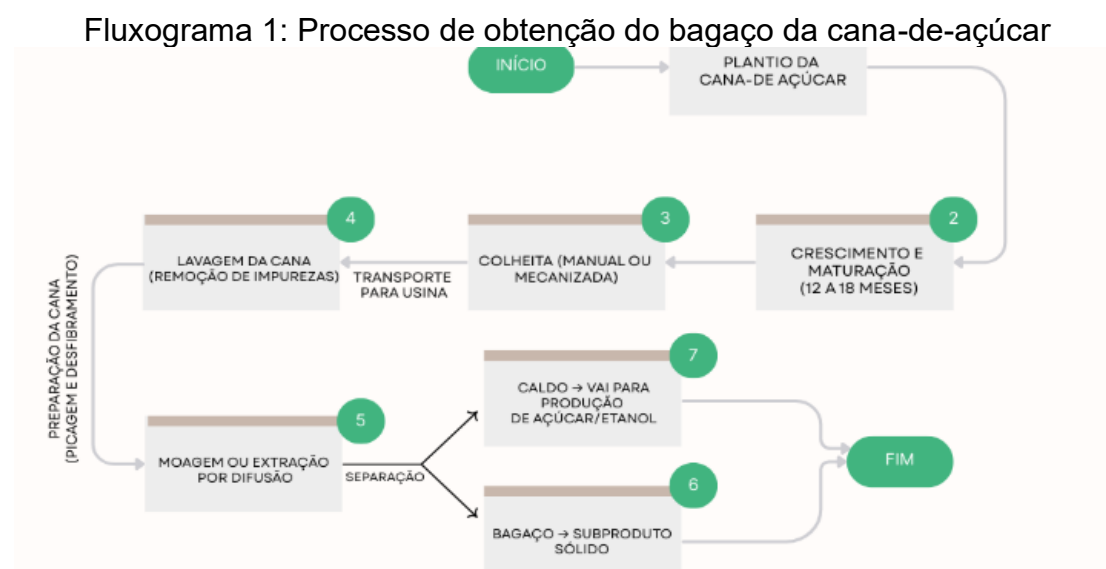
Segundo Flausinio (2015), a cana-de-açúcar, cultivada no Brasil há quase cinco séculos, possui uma história intimamente ligada à formação do país, sendo um dos pilares do processo de colonização. Além disso, ela desempenhou um

papel crucial nas transformações econômicas e sociais do Brasil, tornando-se um dos ciclos econômicos de maior relevância na história do país.

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas mais relevantes do Brasil, tanto pela sua importância econômica quanto pelo papel estratégico na geração de energia e produção de biocombustíveis. Com o aumento da atividade sucroalcooleira, diversos pesquisadores têm realizado vários estudos sobre o uso dos resíduos da cana, como levedura, vinhaça, torta de filtro, ponta de cana e bagaço de cana, sendo o último, quantitativamente, o mais importante (Teixeira et al., 2007).

O bagaço da cana-de-açúcar é o maior resíduo da agroindústria brasileira. Estima-se que, a cada ano, sobrem de 5 a 12 milhões de toneladas deste material, que corresponde a aproximadamente 30% da cana moída (Revista FAPESP, 1998).

O fluxograma 1 abaixo mostra as principais etapas do processo de obtenção do bagaço, começando com o recebimento da matéria-prima até a separação final do resíduo sólido.



Fonte: (Autoria própria, 2025).

Conforme Perez (2021), o bagaço da cana-de-açúcar tem se tornado objeto de estudos cada vez mais frequentes, embora muitos dos produtos obtidos a partir dessa matéria-prima ainda sejam pouco conhecidos devido ao seu caráter não convencional. Nos últimos anos, diversas novas aplicações para o bagaço têm sido desenvolvidas, ampliando seu potencial de aproveitamento, por exemplo, alimentação de bovinos, produção de papel, briquetes, biogás, bioplástico, bioadsorvente, biochar

etc. Habitualmente considerado um resíduo agrícola, esse subproduto tem ganhado destaque em diversas aplicações sustentáveis e tecnológicas.

2.1.1. Composição

De acordo com Lino (2015), a constituição química do bagaço da cana pode variar levemente conforme a variedade de cana utilizada e na região geográfica onde ela é cultivada. O bagaço é constituído predominantemente por macromoléculas como a celulose, as pilioses (também conhecidas como hemiceluloses) e a lignina, que representam seus principais componentes estruturais.

A celulose é o principal componente da parede celular e representa 41 a 44% do bagaço, a lignina representa de 20 a 22%, as hemiceluloses representam 25 a 27% e o restante, cerca de 10%, são componentes minoritários de baixo peso molecular, extrativos e substâncias minerais (Lino, 2015, p.7).

Existem diversos métodos para a extração do bagaço, cada um com suas próprias características. A extração in natura envolve a obtenção do bagaço diretamente da cana-de-açúcar sem a utilização de solventes químicos, mantendo sua composição original e tornando-o adequado para aplicações em que se prefere a matéria-prima natural. Por outro lado, a extração com etanol emprega esse solvente polar para separar componentes solúveis, como açúcares residuais e compostos fenólicos, o que possibilita a obtenção de frações mais purificadas para uso industrial ou farmacêutico. Por último a extração utilizando uma combinação de ciclohexano e etanol permite a utilização de solventes apolares e polares, o que amplia a gama de compostos extraídos, como lipídeos, ceras e outras substâncias bioativas. Esses variados métodos de extração afetam diretamente a composição e o potencial de uso do bagaço, conforme detalhado na Tabela 1 do artigo, caracterização do bagaço de cana-de-açúcar in natura, extraído com etanol ou ciclohexano/etanol apresentado no congresso 47° CBQ, que mostra a composição química típica desse resíduo.

Tabela 1- Composição do bagaço de cana-de-açúcar

Componentes (%)	Bagaço de cana-de-açúcar		
	<i>In natura</i>	<i>Extraído com etanol</i>	<i>Extraído com ciclohexano/etanol</i>
Celobiose	3,34	3,22	3,08
Glicose	46,20	48,17	48,66
Hidroximetilfurfural	0,30	0,30	0,31
Ácido fórmico	0,56	0,39	0,38
Xilose	24,21	24,79	24,27
Arabinose	1,70	1,66	1,66
Furfural	1,25	1,40	1,50
Ácido glucurônico	1,09	0,99	0,93
Ácido acético	2,64	2,83	2,83
Lignina solúvel	2,61	2,62	1,45
Lignina insolúvel	23,66	21,54	21,41
Cinzas	1,61	1,61	1,61
Extrativos	-	4,10	6,13

Fonte: (CANILHA, L. et al., 2007).

2.2. BIOCHAR: DEFINIÇÃO E PROCESSOS DE OBTENÇÃO

Atualmente, uso de resíduos agroindustriais carbonizados está sendo uma alternativa avaliada para melhoria da qualidade do solo, auxiliando na retenção de nutrientes, controle de pH e outras propriedades físico-químicas. Tal produto é denominado de biocarvão pois “bio” indica que é produzido a partir da biomassa, e “char” deriva da abreviação de “charcoal”, termo que significa carvão em inglês.

De acordo com Maia (2010), o carvão vegetal se apresenta como um ótimo material para alcançar um solo adequado segundo a classificação de solos escuros e férteis encontrados na Amazônia, o modelo TPI (Terras Pretas Indígenas), pois apresenta grupos aromáticos condensados, que asseguram sua resistência à degradação química, ou recalcitrância, apresentando um eficiente material para sequestro de carbono.

O biochar é obtido a partir da pirólise da matéria prima, processo no qual ocorre o rompimento das moléculas da biomassa e reorganiza as ligações químicas para formar o biocarvão. Para produzir o biocarvão, é possível utilizar cascas, folhas, palha, estrume, bagaço da cana de açúcar e entre outros.

Na aplicação agrícola, o biochar age como uma esponja de carbono responsável por reter nutrientes, atuando como um condicionador de solo. Além disso, é capaz de remover carbono da atmosfera permanentemente e reduzir emissões de outros GEE (Gases do Efeito Estufa), principalmente metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). O efeito proporcionado pelo biochar é chamado de esponja pois advém da sua alta porosidade e diversidade de grupos funcionais. Os poros tem capacidade de incentivar a habitação de microrganismos que compõem a biota do solo e de aumentar

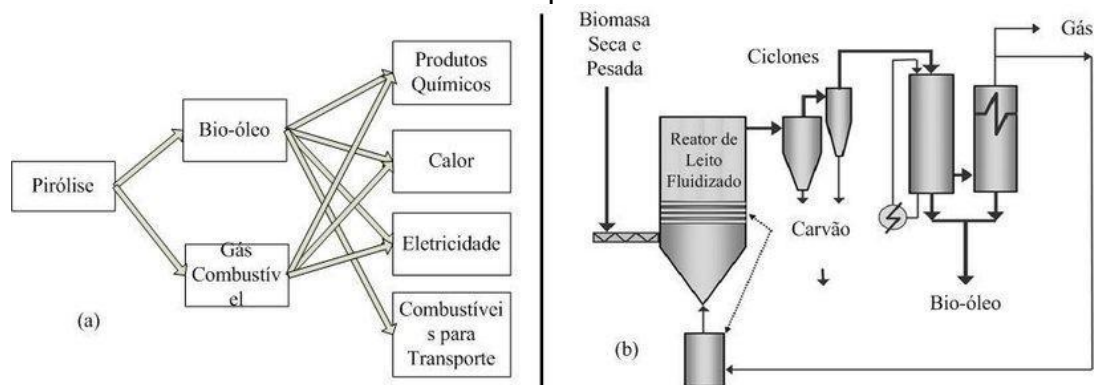
a superfície de contato dos diferentes elementos presentes no solo, resultando em benefícios atmosféricos como remoção de CO₂, redução de odor e produção de energia renovável, e também benefícios para o solo como redução da lixiviação de nutrientes, aumento da fertilidade e retenção de água, portanto, vale ressaltar que esses benefícios dependem do tipo de solo, matéria prima escolhida, clima local, e entre outros parâmetros. Além disso, o potencial do biochar de remoção de carbono na atmosfera está diretamente relacionado ao tempo de sua permanência no solo.

No Brasil, existe apenas uma indústria produtora de biocarvão, localizada em Lajinha, especificamente em Minas Gerais e duas indústrias ainda sendo construídas em Brejetuba (ES) e Machado (MG), sendo as três indústrias planejadas a utilizar a casca de café como matéria-prima. Atualmente existem no mundo 230 empresas focadas na produção de biocarvão que utilizam, 93 projetos em operação.

2.3 PIRÓLISE

O biochar, é obtido a partir da pirólise da matéria orgânica, “a alteração térmica da biomassa em ambiente fechado, com suprimento limitado de oxigênio e em temperaturas relativamente baixas” (TRAZZI et al., 2018, p 1.). Esse processo pode ser aplicado de três maneiras, a partir da pirólise lenta, rápida ou instantânea, visto que o modo de aplicação entre elas se difere com base na taxa de aquecimento e tempo de residência. Além disso, a pirólise é comumente utilizada para gerar diversos produtos como bio-óleo e gás combustível, conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1. Principais produtos da pirólise, suas aplicações e fluxograma do processo de pirólise



Fonte: (Researchgate.net, 2015).

A pirólise lenta, primeiramente, é caracterizada por ocorrer em temperaturas moderadas, normalmente em torno de 300°C e 500°C. O tempo de duração do processo é variável, podendo ser em minutos ou horas, que depende da quantidade a ser produzida e características da matéria orgânica escolhida. A partir dessas particularidades, pode-se afirmar que a pirólise lenta é usada principalmente na produção de carvões sólidos e ideal para métodos que exigem alto teor de carbono.

Dessa forma, de acordo com o exposto, essa classificação do processo é aplicada na agricultura para a produção do material que será produzido neste trabalho, o biochar, além de também ser utilizado em indústrias que demandam de carvão vegetal de alta qualidade.

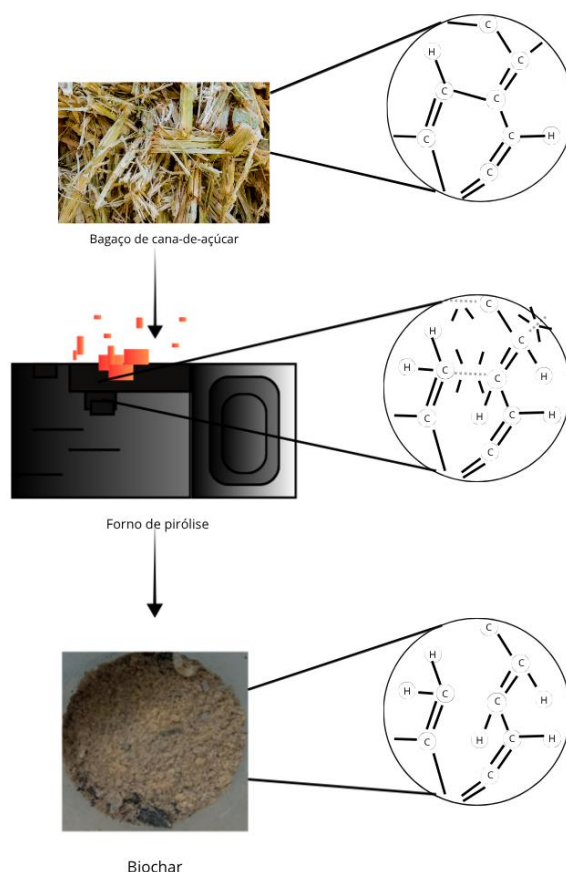
Almeida (2008) afirma que a pirólise rápida é usada principalmente na produção de líquidos, e se caracteriza pelas altas taxas de aquecimento e de transferência de calor, temperatura de reação controlada em torno de 500°C, baixo tempo de residência de vapores, tipicamente menor que dois segundos e resfriamento rápido de vapores.

No processo da pirólise rápida, pode-se concluir:

Diferentes reatores têm sido usados para o processo de pirólise rápida, como reatores a vácuo, de leito fluidizado, de leito transportado, de cone rotativo, de centrífuga de vórtice e de parafuso. Outros sistemas de reação para pirólise rápida incluem pirólise de fluxo entrante radiativo-convectivo, pirólise de micro-ondas, pirólise de leito móvel e fixo, mas sua comercialização é necessária para uma utilização em larga escala. (LUQUE et al., 2016, p 658.)

A pirólise instantânea se caracteriza como um processo de combustão em temperaturas elevadas, podendo chegar em torno de 1000°C podendo até mesmo exceder essa temperatura. O procedimento ocorre em tempos de residência ultracurtos, na maioria das vezes menores que um segundo. Além disso, essa classificação de carbonização permite produzir gases e bio-óleo, devido as altas temperaturas e curto tempo de residência em que o processo é submetido, oferecendo uma rápida decomposição. A aplicação do procedimento se baseia principalmente em processos de síntese química avançada e ruptura molecular da matéria prima, demonstrada pela Figura 2, além de outros que exijam um tempo de duração extremamente curtos, visando altos rendimentos de materiais gasosos e líquidos.

Figura 2: Ilustração da ruptura molecular do bagaço causada pela pirólise



Fonte: (Próprios autores, 2025).

2.4. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOCHAR

De acordo com Nóbrega (2011), o biochar é extremamente poroso, comumente básico e apresenta uma extensa área de superfície específica, possuindo uma estrutura aromática resistente, o que explica sua baixa taxa de degradação em relação a outros tipos de matéria orgânica no solo. Por conta de suas propriedades químicas e físicas, pode porventura influenciar as propriedades do solo como sua densidade, pH (potencial hidrogeniônico), alta porosidade e extensa área superficial específica, contribui para o condicionamento do solo, executando funções como o sequestro de carbono, absorção de nutrientes do solo e a capacidade de troca catiônica (CTC).

Tais características fomentam uma redução da lixiviação de nutrientes do solo e da acessibilidade de íons aos microrganismos do solo, porém, sua eficácia pode variar de acordo com a matéria-prima utilizada na produção do biochar,

qualidade do material utilizado, quantidade de biomassa utilizado e das condições da pirólise utilizada, assim como diz Nóbrega (2011).

Um bom biochar apresenta estrutura interna inerte, que se assemelha com o grafite, fazendo com que preserve (sequestre) o carbono no solo por um tempo muito prolongado, e uma estrutura periférica (externa) reativa para atuar como a matéria orgânica natural do ambiente (REZENDE et al., 2011). Com isso, o biochar promove funções como a estruturação do solo com ligações químicas entre o biochar e estruturas macromoleculares inorgânicas, prevenindo assim, desmoronamentos de terrenos durante períodos de chuvas, retendo a água proveniente da chuva e de irrigação, liberando-a em períodos secos, permitindo a liberação e retenção de íons H^+ e OH^- e de íons metálicos como Ca, Fe e Cu, assim como diz Rezende et al. (2011) e Martins (2018).

2.4.1 Aplicações do Biochar na Agricultura

Nos métodos de produção agrônoma, o biochar pode operar como condicionador de solo para melhorar ou até mesmo potencializar a qualidade desse solo, possibilitando um crescimento significativo nas plantas. Desse modo, ele pode agir diretamente no fortalecimento de nutrientes para as plantas ou indiretamente melhorando o “ambiente” sendo ele o solo, auxiliando a reduzir a lixiviação de nutrientes, com o aprimoramento da eficiência de fertilizante (MONTEIRO; ICARO, 2023).

A possibilidade do aumento da captação de água pelo solo por meio da aplicação do biochar faz-se com que este demonstre alto potencial para ser acrescentado na agricultura visando a economia de água, ou até em regiões onde o cultivo é dependente da chuva, coadjuvando as culturas a passarem por períodos maiores suscetíveis ao déficit hídrico (MONTEIRO; ICARO, 2023).

Também contribui para a agregação do solo por meio de interações com matéria orgânica, minerais e microrganismos, e com o tempo desenvolve alta capacidade de troca catiônica (CTC), o que potencializa a ligação de nutrientes e partículas do solo. Além disso, estimula a atividade biológica, promovendo a reciclagem de nutrientes da biomassa e aumentando a fertilidade do solo, principalmente devido à sua grande área superficial. A liberação de nutrientes como Ca, Mg, K e P depende do pH e da força iônica do solo (NÓBREGA, 2011).

2.4.2. Retenção de nutrientes e água com a adição de biochar no solo

De acordo com Monteiro Icaro (2023), apud Ramlow et al, (2019), a adoção conjunta de estratégias de irrigação por déficit e a elevação da capacidade de retenção de água no solo por meio da aplicação de biochar podem contribuir para a diminuição do estresse hídrico nas culturas e para a redução do consumo total de água. Além disso, destaca-se a importância de ajustar adequadamente o momento e a intensidade do déficit de irrigação, com o objetivo de potencializar a retenção de água proporcionada pelo biochar e, consequentemente, suavizar os efeitos do estresse hídrico sobre as plantas.

A superfície específica do solo é um aspecto extremamente importante tendo em vista que interfere em todas as funções primordiais para a fertilidade do mesmo incluindo ciclos de água, ar e dos nutrientes e a ação microbiológica (NÓBREGA, 2011, apud BAILEY et al., 2011). Solos arenosos tem uma eficiência limitada no quesito armazenamento de água e nutrientes para a planta, isso se deve, em parte, a pequena área superficial das partículas.

As argilas possuem uma superfície específica maior em comparação à areia. Por isso, solos com alta fração de argila apresentam maior capacidade de retenção de água, embora tenham baixa aeração. A presença elevada de matéria orgânica contribui para o aumento da retenção de água, funcionando como uma solução tanto para solos argilosos quanto arenosos. O biochar atua de forma semelhante à matéria orgânica, pois apresenta uma superfície específica maior que a da areia e comparável ou superior à da argila. Assim, sua adição ao solo promove um aumento líquido da superfície específica, melhorando suas propriedades. (NÓBREGA, 2011).

A rede de poros do solo pode ser afetada pela porosidade inerente do biochar assim como suas outras características. O tamanho das partículas do biochar e sua distribuição, são fatores determinantes que levam a resultados variados para diferentes combinações de solo, clima e gestão. A hidrologia do solo pode ser afetada pelo bloqueio total ou parcial dos poros do solo pela menor fração de partículas do biochar, reduzindo a taxa de infiltração de água (NÓBREGA, 2011).

2.4.3. Sequestro de carbono com biochar

O sequestro de carbono define-se pela característica das plantas reter e armazenar gases do efeito como o CO₂ estufa de forma estável e inerte, ao invés de ser emitido para a atmosfera, sendo assim, o uso do biochar como um aditivo no solo resulta na diminuição das emissões de gases de efeito estufa diretamente pela sua propriedade de sequestrar o carbono sólido no solo por muitos anos, e indiretamente pela melhoria da fertilidade do solo (PINTO, 2025). A partir disto, de acordo com Pinto (2025), os sistemas do biochar podem impactar tanto nas emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) quanto o sequestro de carbono por meio de três mecanismos principais:

[...] redução da mineralização do carbono e das emissões não-CO₂ do próprio biochar em comparação com a biomassa não pirolisada; emissões associadas à conversão termoquímica da biomassa e emissões evitadas de combustíveis fósseis, caso a energia gerada seja produzida com captura e armazenamento de carbono; e alterações nas emissões de GEE após a aplicação do biochar no solo, que incluem o aumento do crescimento das plantas (resultando em maior armazenamento de carbono na vegetação), menores emissões de GEE não-CO₂ do solo e redução da mineralização da matéria orgânica do solo[...] (LEHMAN et al., 2021).

Contudo, pode se observar que o sequestro de carbono é uma das características principais do biochar, visto que a fertilidade do solo é estimulada por conta do carbono armazenado pelo biochar, fomentando também a redução da necessidade de fertilizantes industriais e, portanto, faz com que as liberações de carbono durante a produção, transportação e aplicação de fertilizantes (QIAN et al., 2015).

3. METODOLOGIA

O efetivo trabalho baseou-se em artigos científicos, trabalhos acadêmicos, sites, e pesquisas bibliográficas, voltados para os impactos que o biochar produzido a partir do bagaço da cana-de-açúcar, baseando-se como principal embasamento o trabalho de Nóbrega (2011). Além disso, foram feitos experimentos práticos para a aplicação do biochar produzido em laboratório no solo, a fim de

identificar seus impactos e propriedades no solo, visando novas formas de reaproveitar o bagaço da cana-de-açúcar.

4. DESENVOLVIMENTO

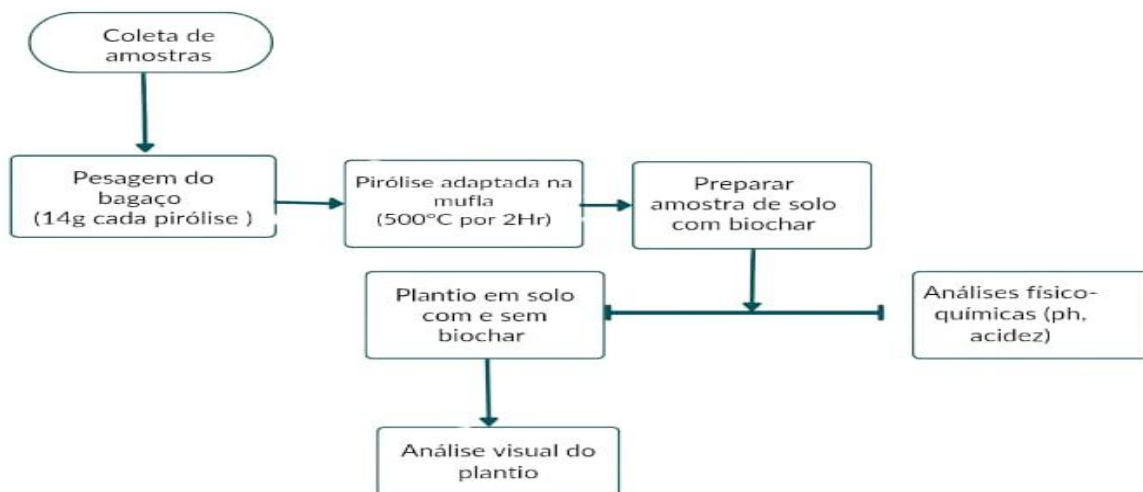
Para o desenvolvimento do biochar a partir do bagaço da cana-de-açúcar, utilizou processos cujo objetivo foi otimizar as propriedades físico-químicas do solo como, nutrientes (K, Ca e Mg) e melhorar a retenção de água. Dessa forma, o desenvolvimento e a otimização dos processos de pirólise para a produção de biochar a partir do bagaço de cana representa um avanço tecnológico significativo e uma estratégia eficaz relacionados à sustentabilidade ambiental, à segurança energética e à gestão de resíduos agroindustriais.

Tabela 2: Materiais e reagentes empregados no processo

Etapas do procedimento	MATERIAIS	REAGENTES
PIRÓLISE	- Mufila - Cadinho - Pinça	Bagaço de cana de açúcar
ANALISE VISUAL	- Copo plastico - Terra com biochar - Terra sem biochar	Água
TESTE DE pH	- Bastão de vidro. - Pipeta. - Balão volumétrico de 1 L. - Copo plástico de 100 mL ou tubo de centrifuga de fundo cônico tipo Falcon de 50 mL, com tampa. - Balança semi-analítica.	- Solução de KCl 1 mol L⁻¹ - Solução padrão de CaCl₂ 1 mol L⁻¹ - Solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ - Soluções padrão pH 4,00 e pH 7,00
TESTE DE ACIDEZ	- Bureta volumétrica. - Balões volumétricos de 100 mL, 250 mL e de 1 L. - Pipeta graduada. - Pipeta volumétrica de 25 mL. - Balança semii analítica. - Agitador horizontal circular.	- Indicador fenolftaleína 1% - Solução de hidróxido de sódio 0,025 mol L⁻¹ - Solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ - Solução de HCl 0,1 mol L⁻¹ - Solução extratora de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹

Fonte: (Próprios autores, 2025).

Fluxograma 2: Etapas da produção do biochar



Fonte: (Próprios autores, 2025).

4.1. PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado no estudo foi coletado em uma usina sucroalcooleira localizada na região de Fernandópolis. Inicialmente, o bagaço foi triturado e para obtenção de uma granulometria uniforme, tal etapa é fundamental, pois o tamanho das partículas influencia diretamente na transferência de calor e na qualidade do biochar produzido, em seguida o material ficou exposto ao ar livre ocorrendo um processo de secagem, e consequentemente reduzindo o teor de umidade.

4.2. PROCESSO DE PIRÓLISE

O processo que foi utilizado foi a pirólise lenta, que primeiramente, é caracterizada por ocorrer em temperaturas de 300°C e 500°C. O tempo de duração do processo foi de 2 horas. Pesou-se em média 4g de bagaço de cana-de-açúcar por cadinho, após pesagem os cadinhos foram levados a mufla para ser iniciado o processo da pirólise.

5. RESULTADOS

Após realizar 15 pirólises, obteve-se como produto cinco gramas de biochar, com coloração semelhante a cinzas e baixa densidade ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Biochar obtido após a pirólise



Fonte: (Próprios autores, 2025).

5.1. AVALIAÇÃO NO SOLO

Com o objetivo de comprovar a eficiência e eficácia do biochar, realizou-se análises físico-químicas de pH e acidez potencial em amostras de solo com biochar e sem biochar, a fim de obter um comparativo dos impactos físico-químicos do material produzido em contato com o solo.

5.1.1. Análise de pH

Para a realização dos experimentos, primeiramente foi feita a análise de pH do solo com e sem biochar. Para isso, foram preparadas as soluções de KCl 1 mol L⁻¹, dissolvendo 37,25 g em 500 ml de água destilada, e para a solução padrão de CaCl₂ 1 mol L⁻¹ foi dissolvido 73,5 g para 500 ml de água destilada, para posteriormente diluir novamente a solução a fim de adquirir uma solução de CaCl₂ 0,01 mol.L⁻¹ em um balão volumétrico.

Logo após, foram pesados em um béquer 5 g de solo puro, e em outro béquer com 5 g de biochar com solo. Com isso feito, foram adicionados 12,5 ml da solução salina de KCl aos béqueres contendo o solo, agitado com bastão de vidro individual por cerca de 1 minuto e deixado em repouso por 1 hora. Após o repouso, as amostras foram ligeiramente agitadas com um bastão de vidro e, mergulhado os eletrodos do pHmetro previamente calibrado para a leitura do pH.

Ao ser incorporado ao solo, o biochar promoveu aumento do pH em comparação ao solo puro, conforme a Tabela 3, evidenciando seu efeito alcalinizante, decorrente da concentração de minerais básicos presentes no material.

Tabela 3: Valores de pH obtidos das amostras de solo

Solo	pH
sem biochar	6.45
com biochar	8.90

Fonte: (Próprios autores, 2025).

5.1.2. Análise de acidez do solo

Primeiramente, para as análises das amostras de solo foi feito uma solução de NaOH (hidróxido de sódio), pesando 4 g de NaOH, diluindo em 1 L de água destilada, obtendo uma solução de NaOH 0,1 mol/L. Em seguida, foi produzido uma solução extratora $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}$ p.a (acetato de cálcio), pesando 44 g do reagente e dissolvido em 500 mL de água destilada, obtendo uma solução com concentração de 0,5 mol/L. Posteriormente, diluiu-se 62,5 mL da solução de NaOH em 250 mL de água destilada, obtendo uma concentração de 0,025 mol/L e realizou-se a padronização.

Logo após, pesou-se cinco gramas de solo com biochar em um erlenmeyer e adicionou-se 75 mL da solução extratora. Colocou-se em agitação magnética por 10 minutos e deixou-se em repouso durante uma noite.

Com objetivo de obter um comparativo da acidez potencial do solo com biochar em relação ao solo sem biochar, repetiu-se todo o processo até o fim da análise substituindo o solo sem biochar para o solo com biochar.

Após o período de repouso, pipetou-se 25 mL da solução sobrenadante da amostra e transferiu-se para um erlenmeyer de 125mL, adicionando 3 gotas de fenolftaleína e titulou-se com a solução de hidróxido de sódio 0,025 mol/L anteriormente diluída, anotando o volume gasto. Em seguida, pipetou-se 25 mL da solução extratora (branco), adicionou-se 3 gotas de fenolftaleína e titulou-se com a solução de NaOH 0,025 mol/L, anotando o volume gasto.

Por fim, aplicou-se os valores obtidos na seguinte fórmula:

$$(H^+ + Al^{3+}) = (V_a - V_b) \cdot 1,65 \cdot f$$

Em que:

$(H^+ + Al^{3+})$ – acidez potencial do solo, em cmolc kg⁻¹

V_a – volume da solução padronizada de NaOH 0,025 mol L⁻¹ gasto na titulação da amostra, em mL.

V_b – volume da solução padronizada de NaOH 0,025 mol L⁻¹ gasto na titulação da prova em branco, em mL.

Valor 1,65 – fator de correção, decorrente das alíquotas tomadas e da extração de apenas 90% da acidez por este método.

F – fator de correção considerando a padronização da solução de NaOH, em que $f = 0,025 / [NaOH_{pad}]$.

Após os cálculos, obteve-se os valores de acidez potencial das amostras de solo descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Valores obtidos da acidez das amostras de solo.

Acidez potencial do solo	
Solo com biochar	Solo sem biochar
1,15	2,80

Fonte: (Próprios autores, 2025).

A partir disso, sabe-se que quanto menor a acidez potencial, melhor é o solo, pois acidez potencial alta indica maior quantidade de H⁺ e Al³⁺ trocáveis, maior necessidade de calagem, mais risco de toxidez por alumínio, e menor fertilidade natural. Portanto a análise mostra que o solo com biochar é o mais adequado, pois indica menor presença de íons ácidos e melhor condição química para o desenvolvimento das plantas.

5.1.3. Análises visuais

Com o objetivo de analisar a capacidade erosiva do biochar e sua influência na absorção de água no solo, realizou-se duas amostras visuais de solo simulando um plantio, sendo diariamente irrigado com água. Após duas semanas, observou-se de forma qualitativa após um dia chuvoso, que o solo com biochar apresentou maior retenção de umidade conforme a Figura 4, atribuída à sua elevada porosidade. Além disso, foi comprovado que o biochar melhora a capacidade erosiva

do solo de acordo com a Figura 5, pois atua diretamente na estrutura, estabilidade e retenção de água, reduzindo os processos que favorecem a erosão.

Figura 4: Comparativo da retenção de água



Fonte: (Próprios autores, 2025).

Figura 5: Comparativo da erosão solo



Fonte: (Próprios autores, 2025).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu avaliar a produção de biochar a partir do bagaço da cana-de-açúcar, bem como investigar seus efeitos nas propriedades físico-químicas do solo, com ênfase na variação do pH e da acidez potencial. A pirólise lenta demonstrou ser um método eficiente para a obtenção do biochar, resultando em um material de baixa densidade e coloração característica de carbonizados, com rendimento satisfatório após as 15 pirólises realizadas.

Os resultados obtidos evidenciam que a incorporação do biochar promoveu melhorias significativas na qualidade química do solo. A análise de pH demonstrou aumento considerável em comparação ao solo puro, confirmando o caráter alcalinizante do material, decorrente da presença de minerais básicos. Esse efeito é particularmente relevante para solos ácidos, comuns em diversas regiões agrícolas, que frequentemente necessitam de correções para melhor desenvolvimento das plantas.

Da mesma forma, a análise de acidez potencial revelou redução expressiva nos valores de $H^+ + Al^{3+}$ após a adição do biochar, indicando menor presença de íons ácidos e menor risco de toxidez por alumínio. Tal diminuição da acidez potencial contribui para melhorar a fertilidade natural do solo, aumentando sua capacidade de troca de cátions e favorecendo a disponibilidade de nutrientes essenciais ao crescimento vegetal.

Portanto, os resultados obtidos confirmam o potencial do biochar produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar como um condicionador de solo eficiente e sustentável. Além de melhorar propriedades químicas importantes, sua utilização representa uma alternativa ambientalmente adequada para o aproveitamento de resíduos agroindustriais, contribuindo para práticas agrícolas mais responsáveis, econômicas e alinhadas com os princípios da sustentabilidade.

Conclui-se que o biochar apresenta grande aplicabilidade no manejo e recuperação de solos, sendo um recurso promissor para futuras pesquisas e para a implementação em sistemas agrícolas que busquem maior produtividade e menor impacto ambiental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBRUZZINI, Thalita Fernanda. ***The role of biochar on greenhouse gas offsets, improvement of soil attributes and nutrient use efficiency in tropical soils***. 2015. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. doi: 10.11606/T.11.2015.tde-30092015-115437. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-30092015-115437/publico/Thalita_Fernanda_Abbruzzo_zini_versao_revisada.pdf>. Acesso em: set. 2025.

BARROS, J.F.C. **Fertilidade do solo e Nutrição das plantas**. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/28120/1/P.%20Pedag%C3%B3gica%20-%20Fertiliza%C3%A7%C3%A3o%20das%20culturas.pdf>>. Acesso em: out. 2025.

BENTIVOGLIO, Deborah e FINCO, Adele e BACCHI, Mirian Rumenos Piedade. ***Interdependencies between Biofuel, Fuel and Food Prices: The Case of the Brazilian Ethanol Market***. Energies, v. 9, n. 6, 2016Tradução. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en9060464>>. Acesso em: 30 nov. 2025.

CANILHA, L.; CARVALHO, W.; ROCHA, G. J. M.; ALMEIDA E SILVA, J. B.; GIULIETTI, M. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar in natura, extraído com etanol ou ciclohexano/etanol**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA –

CBQ, 47., 2007, Natal, RN. Disponível em: <<https://www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos/11/11-570-713.htm>>. Acesso em: 30 nov. 2025.

FAPESP. **Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar.** *Revista Pesquisa FAPESP*, 1998. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 15 maio 2025.

FLAUSINIO, B. F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais.** 2015. 169p. Tese (Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares) - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR, Universidade Federal de Minas Gerais, BELO HORIZONTE, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/7fea339b-0100-48a2-9928-f3ecacb3c896/content>>. Acesso em: nov. 2025

GALVÃO, Í. M. **Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com biochar de cana-de-açúcar.** Universidade de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-30092015-115437/publico/Thalita_Fernanda_Abbuzzini_versao_revisada.pdf>. Acesso em: nov. 2025.

LINO, Alessandro Guarino. **Composição química e estrutural da lignina e lipídios do bagaço e palha da cana-de-açúcar.** 2015. 97 f. Tese (Doutorado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/ceea36af-57ce-4804-a760-86a4514f0a84/content>>. Acesso em: nov. 2025.

MARTINS, C.C. **Biochar, composto orgânico e potássio nas características químicas e lixiviação de nutrientes em espodossolo e no cultivo de mucuna preta e moringa.** 2018. 126 f. Tese. MIRANDA, N.T. Investigação das condições operacionais para produção de bio-óleo e biochar a partir de bagaço de cana-de-açúcar por meio de simulação e aplicação em planta piloto. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2018. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1062947>>. Acesso em: nov. 2025.

MOTA, A. M. A.; SILVA LIMA, A. A.; SANTOS, F. F. P.; CASELLI, F. T. R.; VIEGAS, R. A. **Pirólise da biomassa lignocelulósica: uma revisão.** *Revista GEINTEC: Gestão, Inovação e Tecnologias*, v. 5, n. 4, p. 2511–2525, dez. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Principais-produtos-da-pirolise-e-suas-aplicacoes-a-e-fluxograma-do-processo_fig1_287404935>. Acesso em: 30 nov. 2025.

NÓBREGA, Í. P. C. **Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) — Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <<https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/adubacao/EFEITOS%20DO%20BIOCHAR%20NAS%20PROPRIEDADE>>. Acesso em: out. 2025.

PINTO, F. G. S.; SANTOS, C. V., et al. **Microbiologia e Biotecnologia Ambiental** in Foco: tema sustentabilidade, v.2. Belo Horizonte: Poisson, 2025. ISBN 978-65-5866-527-4. DOI: 10.36229/978-65-5866-527-4. Disponível em: <https://livros.poisson.com.br/individuais/Microbiologia_Biotecnologia/volume2/Microbiologia_Biotecnologia_Vol2.pdf#page=92>. Acesso em: nov. 2025.

REZENDE, E. I. P. et al. **Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono**. Ci. Inf., Paraná, v. 3, n. 5, p. 426-433, novembro. 2011. Disponível em: <<https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/204/200>>. Acesso em: nov. 2025.

SILVA, H.D.M.; UEMA ALCANTARA., et al. **Produção e caracterização do biocarvão obtido de palha de cana-de-açúcar**. Revista Matéria, v.28, n.4, n.p, 2023. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/tDPCpVkJPbbKVZkVZTkR67BJ/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: out. 2025.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>>. Acesso em: 30 nov. 2025.

TEIXEIRA, F.A.; PIRES, A.V.; NASCIMENTO, P.V.N. **Bagaço de cana-de-açúcar na alimentação de bovinos**. REDVET, v.8, n.6, n.p, 2007. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/636/63612660008.pdf>>. Acesso em: out. 2025.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. **Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875–887, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cflo/a/TR9WzGZhYHdsnz4vBzFt7H/?lang=pt>>. Acesso em: 30 nov. 2025.

Woolf, D.; Amonette, J.E.; Street-Perrot, F.A.; Lehmann, J.; Joseph, S. **Sustainable biochar to mitigate global climate change**. Nature Communications, vol. 1, 2010, pp. 1-9. Disponível em: <<https://rdcu.be/eSn71>>. Acesso em: 30 nov. 2025.