

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS
UNIDADE FRUTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS**

**EFEITO DO CONDICIONAMENTO DE SOLO COM
BIOCARVÃO NA BIOMASSA MICROBIANA (FUNGOS E
BACTÉRIAS) E NO CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**Bruna Cristina Pinto
Engenheira Ambiental**

FRUTAL-MG

2022

Bruna Cristina Pinto

**EFEITO DO CONDICIONAMENTO DE SOLO COM
BIOCARVÃO NA BIOMASSA MICROBIANA (FUNGOS E
BACTÉRIAS) E NO CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Acadêmica de Frutal, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, para obtenção do título de Mestre.

Orientador:

Dr. Alan Rodrigues Teixeira Machado

Coorientadora:

Dra. Osania Emerenciano Ferreira

FRUTAL–MG

2022

Pinto, Bruna Cristina.

P659e Efeito do condicionamento de solo com biocarvão na biomassa microbiana (fungos e bactérias) e, no crescimento da cana-de-açúcar /

Bruna Cristina Pinto – 2022.

67 f.: il., tabelas, gráficos, imagens.

Orientador: Alan Rodrigues Teixeira Machado

Coorientadora: Osania Emerenciano Ferreira.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal 2022.

Bibliografia: 58 – 67.

1. Biometria. 2. Forno de duplo tambor. I. Machado, Alan Rodrigues Teixeira. II. Ferreira, Osania Emerenciano. III. Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal. IV. Título.

CDD – 631

CDU – 631.46

**EFEITO DO CONDICIONAMENTO DE SOLO COM BIOCARVÃO NA BIOMASSA
MICROBIANA (FUNGOS E BACTÉRIAS) E NO CRESCIMENTO DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Acadêmica de Frutal, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 29 de agosto de 2022

Dra. Jussara Aparecida de Oliveira Cotta, Universidade do Estado de Minas Gerais.

Dra. Fernanda Palladino Pedroso, Universidade Federal de Minas Gerais.

Dr. Alan Rodrigues Teixeira Machado

Orientador

Dra. Osania Emerenciano Ferreira

Coorientadora

FRUTAL–MG

2022

Dedico este trabalho aos meus pais e irmã,
grandes colaboradores e incentivadores,
amores e luzes da minha vida.

“Somos o que pensamos.
Tudo o que somos surge com nossos pensamentos.
Com nossos pensamentos, fazemos o nosso mundo”
(Buda).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por me abençoar, iluminar e guiar todos os dias.

À minha mãe, Maria Aparecida Leite, ao meu pai, Luiz Eustáquio Pinto e à minha irmã, Aline Cristina Pinto, por estarem sempre ao meu lado, mesmo com a distância, abraçando meus sonhos, incentivando minhas atividades, abrindo minha mente e me ajudando de todas as formas, sempre com zelo, amor e carinho. Agradeço também aos demais familiares, por tanta energia positiva depositada em minha vida.

Ao meu orientador, Alan Rodrigues Teixeira Machado, por acreditar em mim, por todos os ensinamentos compartilhados, pela amizade, paciência e por estar sempre disposto a desenvolver algum projeto.

À minha coorientadora, Osania Emerenciano Ferreira, por ser um anjo durante toda minha permanência em Frutal, pela amizade, ensinamentos e práticas sofridas. Agradeço seus tios Oracilda e Darco, por abrirem a porta de sua casa, serem tão solícitos e me ajudarem tanto.

Aos meus colegas e professores do programa, por todas as atividades desenvolvidas, conhecimentos transmitidos e por me receberem tão bem. Em especial, agradeço à Cristiele Costa de Souza, por motivar minha aplicação no mestrado e estar sempre disposta a contribuir.

Aos técnicos do laboratório, em especial, Adriana Barboza Alves, por me acompanharem e auxiliarem em todas as etapas de desenvolvimento desta pesquisa.

À Usina Cerradão, pela disponibilização do bagaço de cana-de-açúcar, biomassa para produção do biocarvão. Ao CanaTech Agro, nas pessoas de Michel e Geo, pela disponibilização do solo, mudas de cana-de-açúcar e estufa para plantio e instalação do experimento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo auxílio financeiro.

À Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico, muitíssimo obrigada!

RESUMO

Para contornar os problemas de solos degradados e inférteis, ganham destaque os condicionadores do solo, que agem proporcionando equilíbrio físico, químico e biológico ao substrato, aumentando a sua capacidade de suporte e nutrição de plantas. Neste contexto, inúmeras pesquisas apontam para o potencial do biocarvão, um material rico em carbono produzido a partir da pirólise da biomassa. No entanto, os mecanismos de interação entre o biocarvão e o solo e nas culturas ainda não estão completamente elucidados. Nesse sentido, esta pesquisa tem por objetivo investigar o efeito do condicionamento de solo de canavial com biocarvão produzido a partir da biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), verificar sua influência nas condições físico-químicas e microbiológicas do solo e no desempenho agrônômico de mudas da cana. Para tanto, o biocarvão foi produzido por meio de pirólise em um forno de duplo tambor, moído e submetido à caracterização tecnológica. O experimento de cultivo foi montado em estufa, com fotoperíodo claro: escuro de 12 h. O solo coletado em Frutal-MG foi misturado com diferentes percentuais em massa (N-0%, 1-1%, 3-3% e 5-5%) do biocarvão produzido. Para fins de comparação também foi utilizado o biocarvão comercial (Biochar®), misturado com o solo na proporção em massa de 5 % (CC). Esse experimento foi repetido cinco vezes para avaliação em dois períodos de 30 dias, totalizando 50 vasos de 3 L. Cada vaso recebeu uma muda pré-brotada de cana-de-açúcar. As amostragens para as análises de biomassa microbiana e características físico-químicas do solo foram realizadas por vaso. Avaliou-se a carga microbiana de bactérias totais em Ágar Nutriente acrescido de antifúngico e para Fungos Totais utilizou o Meio Martin. O crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar foi avaliado pelos parâmetros altura, diâmetro da base, diâmetro da ponta, número de entrenós, número de folhas, número de perfilhos, massa total, massa do colmo, massas das folhas, massa da raiz, massa seca do colmo, massa seca da folha, massa seca da raiz e comprimento, ao longo do tempo em cada dose de biocarvão. A análise estatística dos dados da biometria da cana-de-açúcar, biomassa microbiana e caracterização do solo, foi obtida pela análise de variância ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5 % de significância no software estatístico Minitab 17. Os resultados apontaram para um biocarvão poroso com grande área superficial, características que permitem maior retenção de água e nutrientes no meio. A presença do biocarvão proporcionou o acúmulo significativo de umidade no solo no tratamento com 3 % de biocarvão. E, ao analisar os dados biométricos, verificou-se que não há diferença significativa na maioria dos parâmetros abordados. Além

disso, o desenvolvimento da microbiota no solo foi significativo apenas para unidades formadoras de bactéria no tratamento com 3 % de biocarvão no solo. Com isso, conclui-se que o biocarvão feito a partir do bagaço de cana-de-açúcar apresenta características que o torna um bioproduto promissor para uso na agricultura como condicionador.

Palavras-chave: Biochar. Biometria. Microbiologia. Forno de duplo tambor.

ABSTRACT

To circumvent the problems of degraded and infertile soils, soil conditioners are highlighted, which act by providing physical, chemical and biological balance in the substrate, increasing its support capacity and plant nutrition. In this context, numerous studies point to the potential of biochar, a material rich in carbon produced from the pyrolysis of biomass. However, the mechanisms of interaction between biochar and soil and in crops are not yet fully elucidated. In this sense, this research aims to investigate the effect of conditioning sugarcane soil with biochar produced from sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) biomass, verify its influence on the physicochemical and microbiological conditions of the soil and on the agronomic performance of seedlings of the cane. Therefore, the biochar was produced by means of pyrolysis in a double drum oven, ground and subjected to technological characterization. The experiment was set up in a greenhouse, with a light: dark photoperiod of 12 h. The soil collected in Frutal-MG was mixed with different percentages by mass (N-0%, 1-1%, 3-3% and 5-5%) of the biochar produced. For comparison purposes, commercial biochar (Biochar®) was also used, mixed with the soil in the proportion by mass of 5% (CC). This cultivation experiment was repeated five times for evaluation in two periods of 30 days, totaling 50 3 L pots. Each pot received a pre-sprouted cane seedling. Sampling for the analysis of microbial biomass and physicochemical characteristics of the soil were carried out per pot. The microbial load of total bacteria was evaluated on Nutrient Agar plus antifungal and for Total Fungi, Martin Medium was used. The growth and development of sugarcane was evaluated by the parameters height, base diameter, tip diameter, number of internodes, number of leaves, number of tillers, total mass, stem mass, leaf mass, root mass, dry mass of the stem, leaf dry mass, root dry mass and root length and, over time at each biochar dose. Statistical analysis of data on sugarcane biometry, microbial biomass and soil characterization was obtained by ANOVA analysis of variance and means were compared by Tukey's test at 5% significance in Minitab 17 statistical software. The results pointed to a biochar porous with large surface area, characteristics that allow greater retention of water and nutrients in the medium. The presence of biochar provided a significant accumulation of soil moisture in the 3% treatment. And, when analyzing the biometric data of sugarcane, it was found that there is no significant difference in most of the parameters addressed. Furthermore, the development of soil microbiota was significant only for bacteria-forming units in the treatment with 3% biochar in the soil. With this, it is concluded

that biochar made from sugarcane bagasse has characteristics that make it a promising bioproduct for use in agriculture.

Keywords: Biochar. Biometry. Microbiology. Double drum furnace.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo geral	18
1.1.1 Objetivos específicos	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 A cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i> L.)	18
2.2 Biocarvão e outros condicionadores de solo	25
2.3 Microrganismos do solo	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Localização e produção do biocarvão	31
3.2 Caracterização do biocarvão.....	31
3.2.1 Determinação do pH.....	31
3.2.2 Determinação da condutividade elétrica (CE).....	32
3.2.3 Teor de materiais voláteis.....	32
3.2.4 Teor de cinzas.....	32
3.2.5 Teor de carbono fixo.....	32
3.2.6 Área superficial pelo método de adsorção do corante azul de metileno (AM)	33
3.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	33
3.2.8 Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRXED).....	34
3.2.9 Análise térmica	34
3.2.10 Análise do lixiviado do biocarvão por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ¹ H)	34
3.3 Efeito do biocarvão nas propriedades físico-químicas do solo de canavial	35
3.3.1 Coleta do solo de canavial	35
3.3.2 Caracterização de propriedades físico-químicas do solo.....	35
3.3.3 Experimento em casa de vegetação	38
3.3.4 Efeito do biocarvão na biomassa microbiana	39
3.3.5 Efeito do biocarvão no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar	40
3.4 Análise estatística	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Caracterização do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar (BBT).....	41
4.2 Efeito do biocarvão sobre as características físico-químicas do solo.....	47
4.3 Desenvolvimento microbiano.....	50
4.4 Efeito do biocarvão no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar	51
5. CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processamento da cana para a produção conjunta de açúcar e etanol	19
Figura 2 – Fórmulas estruturas da celulose, lignina e hemicelulose	23
Figura 3 – Grupos-chave principais de organismos do solo. Adaptado de Moreira; Siqueira, 2006.....	29
Figura 4 – Esquema de um agregado de solo. Adaptado de Cardoso; Andreote, 2016	29
Figura 5 – Área de coleta do solo (19°59'04.8" S; 49°10'31,1" O).....	35
Figura 6 – Área do experimento.....	39
Figura 7 – Curvas termogravimétricas (TG) para o BBT (curva azul) e o BCA (curva preta)	42
Figura 8 – Microscopia eletrônica de varredura do bagaço de cana-de-açúcar (BCA): a) 50x, b) 180x, c) 600x e d) 1200x.....	43
Figura 9 – Microscopia eletrônica de varredura do biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar (BBT): a) 500x, b) 800x, c) 1000x e d) 1800x	44
Figura 10 – (a) Isoterma de adsorção e (b) isoterma linearizada do modelo de Langmuir para adsorção do corante azul de metileno em BBT. A inserção mostra a fórmula do azul de metileno	44
Figura 11 – Espectro por Energia Dispersiva (EDS) do BCA.	46
Figura 12 – Espectro por Energia Dispersiva (EDS) do BBT.....	47
Figura 13 – Triângulo textural do solo para amostras de solo condicionadas com biocarvão produzido da cana-de-açúcar e biocarvão comercial. As cores preto, azul e vermelho representam o tempo de 0, 30 e 60 dias após a instalação do experimento, respectivamente. Os símbolos quadrado, círculo, triângulo, asterisco e esfera representam os tratamentos N, 1, 3, 5 e CC, respectivamente	48
Figura 14 – Espectro de Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (400 MHz, tampão KH_2PO_4 em D_2O , pH 6,0) a 300 K do lixiviado do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo de sedimentação calculado para a fração silte ($0,002\text{ mm} < \varnothing < 0,05\text{ mm}$) em função da temperatura da suspensão para a profundidade de 5 cm e para solos com densidade de partículas média de $2,65\text{ kg.dm}^{-3}$, em determinação efetuada ao nível do mar	37
Tabela 2 – Características químicas do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de de duplo tambor (BBT).....	41
Tabela 3 – Composição química do biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar feita por Fluorescência de Raios X por dispersão de energia	45
Tabela 4 – Resultados da Espectroscopia por Energia Dispersiva (% m/m) para BCA e BBT	46
Tabela 5 – Tabela de componentes do biocarvão comercial, Biochar® Brasil.....	47
Tabela 6 – Resultados do pH e umidade atual das amostras de solos	49
Tabela 7 – Unidades formadoras de colônia dos fungos e bactérias em diferentes concentrações de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio	50
Tabela 8 – Parâmetros de avaliação do desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar em diferentes concentrações de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio	53

LISTA DE ABREVIACÕES

BBT – Biocarvão feito a partir do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor.

BCA – Bagaço de cana-de-açúcar.

MPB – Muda pr brotada.

N – Tratamento sem biocarvão, controle negativo.

1 – Tratamento com adição de 1 %, em massa, de biocarvão

3 – Tratamento com adição de 3 %, em massa, de biocarvão

5 – Tratamento com adição de 5 %, em massa, de biocarvão

CC – Tratamento com adição de 5% de biocarvão comercial (Biochar® Brasil), controle positivo.

AM – Azul de metileno.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) do mundo. Seus produtos são largamente utilizados para fabricação de açúcar, álcool combustível, biodiesel e energia. De acordo com a Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2019 do Ministério de Minas e Energia (MME) (2020), o etanol e a geração de energia com os resíduos da cana-de-açúcar responderam, aproximadamente, por 18 % do total da oferta de energia interna em 2019 no Brasil, valor que aumentou em 5,5 % quando comparado ao ano anterior. Para tanto, a área de cultivo de cana-de-açúcar utilizada na época foi de 8.442 mil hectares, 1,7 % menor que na temporada anterior, mas com uma produtividade média 5,4 % maior que a registrada em 2018/19, alcançando 76.133 kg/ha na esfera nacional (CONAB, 2020).

O etanol e a energia gerada com os resíduos da cana apresentam vantagens como serem fontes de energia renovável, ajudarem na redução de carbono e ser uma oportunidade de renda para os agricultores (HILOIDHARI *et al.*, 2021). Porém associado ao cultivo da cana-de-açúcar, tem-se impactos ambientais como o aumento do desmatamento das áreas de cerrado para implantação da monocultura dessa gramínea, o que prejudica a biodiversidade do bioma, queimadas não naturais e incêndios, que podem provocar a extinção da microbiota do solo, bem como o empobrecimento deste e o desencadeamento de processos erosivos, além da poluição atmosférica e o uso de agroquímicos que prejudicam água, solo e a saúde dos trabalhadores (SILVA; FERREIRA, 2017).

Por ser uma planta de crescimento rápido, a cana-de-açúcar exige muito do solo, com isso, o setor agrícola desembolsa uma grande quantia por hectare para renovação dos canaviais, sendo que, segundo dados do Pecege (ROSA, 2018), 30 % do custo dos insumos (R\$ 1.046,52/ha) são gastos para adubação com fertilizantes e corretivos do solo. A degradação do solo implica na redução do carbono orgânico total e matéria orgânica disponível, contribuindo para emissão de CO₂ à atmosfera, redução da produtividade, aumento da erosão, compactação, deficiência de oxigênio que afeta os microrganismos, redução da umidade e salinização do meio (BRITO *et al.*, 2020; LANGE *et al.*, 2019; RESENDE; ROSOLEN, 2011).

Com a finalidade de reverter esse cenário, uma solução altamente eficaz é o uso dos chamados condicionadores de solos, produtos que agem proporcionando equilíbrio físico, químico e biológico no substrato, aumentando a capacidade de suporte de plantas (FARIA, 2017). Ao longo dos anos, o interesse da comunidade científica para o uso do biocarvão como

estratégia para melhorar as condições do solo, no que tange à disponibilidade de nutrientes às plantas tem sido despertado (CARNEIRO *et al.*, 2021; MOTA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2019; ZELAYA *et al.*, 2019; WOICIECHOWSKI *et al.*, 2018; MATOS *et al.*, 2018).

O biocarvão é um material carbonáceo oriundo da pirólise da biomassa (AWAD *et al.*, 2017). Esse processo permite concentrar o carbono com elevada resistência à degradação, característica importante para manter estoques de carbono no solo, já que o biocarvão compreende formas aromáticas estáveis de carbono orgânico que não podem ser retornados à atmosfera como gás carbônico, mesmo em condições ambientais favoráveis (TRAZZI, *et al.* 2018). Sua composição é dependente da matéria-prima utilizada, bem como das condições de pirólise empregada. Deve-se ainda destacar a presença de uma fração mineral que é composta por macro e micronutrientes que podem atuar como fonte de minerais para os microrganismos que vivem no solo e estar biodisponíveis para as plantas (SALETNIK *et al.*, 2019).

O uso do biocarvão como condicionador de solos está se tornando uma prática comum, pois tem revelado resultados positivos quando aplicado em solos de baixa fertilidade, promovendo a restauração ecológica do solo, mobilidade de nutrientes, retenção de água, entre outras. Além disso, essa prática tem ganhado aceitação como ferramenta de gestão para o sequestro de carbono. Também vale mencionar que a associação do solo ao biocarvão pode reduzir o uso de fertilizantes químicos, bem como aumentar o crescimento de plantas e a atividade microbiana (BOUQBIS *et al.*, 2017).

Embora o potencial do biocarvão tenha sido relatado em diversos trabalhos (CHANG *et al.*, 2021; JIA *et al.*, 2021; YOO *et al.*, 2021; ROMERO *et al.*, 2021), o uso generalizado do biocarvão na agricultura necessita ser investigado com o desenvolvimento de novas pesquisas, uma vez que, o impacto do biocarvão nos microrganismos do solo é bastante diverso e ainda não está completamente elucidado o mecanismo de interação solo, microbiota e biocarvão (GOROVTSOV *et al.*, 2020). Dessa forma, para contribuir com dados sobre esse mecanismo, esta pesquisa busca avaliar a atividade microbiana no solo condicionado com biocarvão, produzido a partir da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar (BCA).

A escolha da biomassa a ser trabalhada, surgiu das condições encontradas para realização do estudo, uma vez que a pesquisa está inserida na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, considerada uma área de fronteira agrícola, sendo composta por 66 municípios. A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas dessa região (DIAS, 2019). De fato, 9 dos 10 principais municípios produtores de cana-de-açúcar em Minas Gerais se concentram

nessa região, em destaque o município de Frutal, que apresenta a segunda maior área plantada de cana-de-açúcar do estado, perdendo apenas para Uberaba (IBGE, 2017).

Além disso, a indústria sucroalcooleira brasileira gera anualmente cerca de 200 milhões de toneladas de resíduos sólidos (entre o bagaço e a torta de filtro). Esses resíduos frequentemente são eliminados pela queima para a produção de energia. No entanto, tecnologias alternativas têm empregado o BCA para produção de materiais com alto valor agregado, tais como: o bioetanol de segunda geração, bio-óleo, biocarvão, entre outros (SILVA *et al.*, 2019; FILHO *et al.*, 2019; XAVIER *et al.*, 2021).

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do condicionamento de solo de canavial com o biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar (BBT), bem como avaliar o efeito desse condicionamento no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar e microrganismos.

1.1.1 Objetivos específicos

- i) Produzir e caracterizar física e quimicamente o BBT;
- ii) Determinar como o biocarvão influencia nas características físico-químicas do solo;
- iii) Avaliar como o biocarvão atua sobre a microbiota do solo nas diferentes doses de biocarvão condicionados ao solo;
- iv) Comparar o crescimento de mudas de cana-de-açúcar cultivadas em vasos com solos condicionados com diferentes doses de biocarvão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)

O cultivo comercial da cana-de-açúcar ocorre em mais de 70 países e territórios, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 18 % da produção e 36 % do comércio mundial de

açúcar (VIDAL, 2021), o que está fortemente ligado ao desenvolvimento econômico do país. Os valores da safra 2020/21 mostram que o volume de produção de cana-de-açúcar chegou a 654,8 milhões de toneladas, 1,8 % a mais que a safra anterior. Toda essa produção está distribuída pelo território brasileiro, sendo o Sudeste a principal região produtora do país, com destaque para os estados de São Paulo e Minas Gerais (CONAB, 2021).

No processamento da cana-de-açúcar para fabricação de açúcar e etanol (Figura 1) são gerados diversos resíduos, vistos como subprodutos, com diferentes características físico-químicas, como a vinhaça, torta de filtro e bagaço. Dessa forma, é de grande importância evitar que esses subprodutos sejam depositados inapropriadamente no ambiente, para evitar a contaminação de solos e águas, sendo necessário o manejo adequado destes resíduos, aproveitando, por exemplo, para reduzir custos e aumentar a lucratividade por meio do reuso agrícola na própria cultura de cana (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2017).

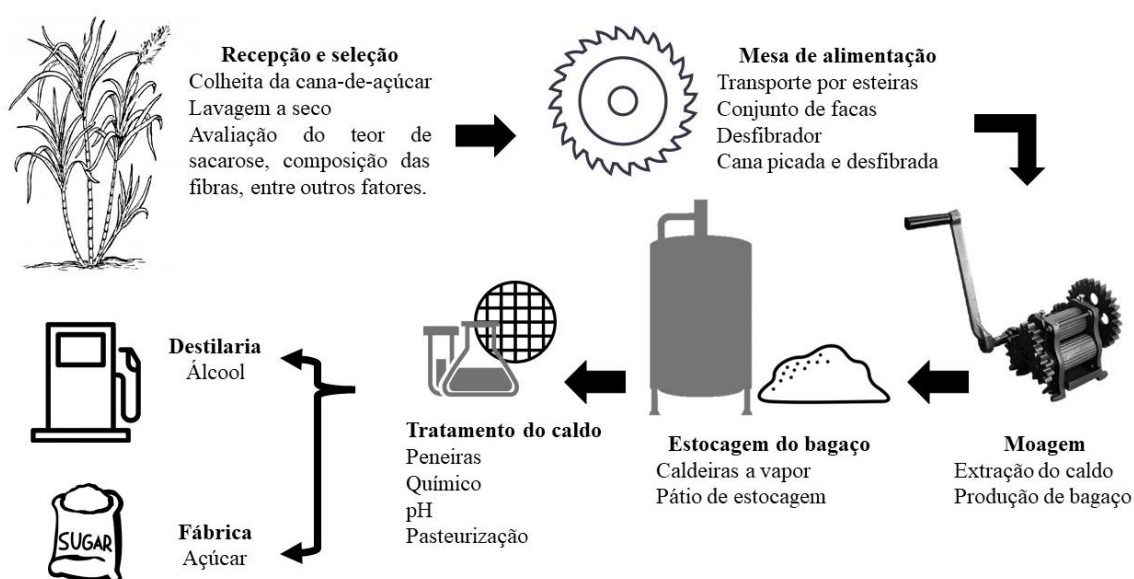


Figura 1– Processamento da cana para a produção conjunta de açúcar e etanol

Autor, 2021.

O processamento tem início com a colheita da cana-de-açúcar inteira, que passa por uma lavagem a seco com jatos de ar para retirar as impurezas, sem que perca a sacarose. Em seguida a cana recebida é amostrada aleatoriamente para avaliação da sua qualidade pela aferição do teor de sacarose, composição das fibras, pureza do caldo, entre outros aspectos. Da mesa de

alimentação, a cana é transportada por esteiras até um conjunto de facas rotativas que picam o material para entrada no desfibrador, onde a cana tem suas células abertas para facilitar a extração dos açúcares durante a moagem. Na moenda, a cana passa entre dois rolos compressores, com uma pressão pré-estabelecida aplicada a eles, para retirada do caldo. Nessa etapa há a produção de bagaço, que com um grau de umidade adequado, ao final do processo pode ser utilizado como combustível nas caldeiras e o excedente enviado ao pátio de estocagem. O caldo extraído da cana durante a moagem contém impurezas, estas devem ser reduzidas para garantir os padrões de qualidade para produção de açúcar e álcool. O tratamento do caldo consiste em remover sólidos insolúveis por meio de peneiras, coagulação, floculação e precipitação, é necessário ainda a correção de pH para evitar a inversão e decomposição da sacarose e a pasteurização com aquecimento e resfriamento imediato (NOVA CANA, 2013).

Com o caldo tratado, existem dois destinos: a produção de açúcar nas fábricas e a de álcool em destilarias. Nas fábricas de açúcar há ainda o tratamento de sulfitação do caldo, que tem a função de inibir reações que causam o surgimento de cor indesejável, formação do precipitado sulfito de cálcio (CaSO_3) e coagulação de coloides solúveis, além de diminuir a viscosidade do caldo e do xarope, massas cozidas e méis, facilitando as operações de evaporação e cozimento (NOVA CANA, 2013). Com o caldo clarificado, a próxima etapa é a evaporação, onde a água precisa ser evaporada para o caldo ser transformado em um xarope concentrado. Esse é cozido para a cristalização e recuperação de 80% a 85% da sacarose, virando uma massa que é centrifugada para que o açúcar seja separado do mel. Por fim, o material é seco, ensacado e armazenado em estoque para venda (VIVAÇÚCAR, 2017).

Nas destilarias, o mosto que surge da centrifugação passa pela fermentação, que consiste em uma série de reações químicas, catalisadas por leveduras, para conversão dos açúcares em álcool, gerando o vinho. Na destilação, objetiva-se separar a água do álcool por meio de diferenças na volatilidade dos componentes da mistura, resultando no álcool hidratado usado como etanol combustível, com grau alcoólico próximo de 96 %. A etapa de desidratação consiste em retirar o restante da água presente no álcool hidratado, resultando no álcool anidro, com grau alcoólico próximo de 99,5%, utilizado em mistura com a gasolina para combustível. Por fim, o etanol anidro e hidratado são armazenados em tanques, até serem transportados às distribuidoras (NOVA CANA, 2012).

Dentre os subprodutos produzidos durante o processamento do álcool e açúcar, a vinhaça é um dos principais subprodutos das destilarias, são gerados de 10 a 15 L desse material

para cada litro de álcool produzido (MAUAD; FERREIRA; TRINDADE, 2017). Isto posto, a comunidade acadêmica busca por diferentes destinações desse subproduto para evitar danos ambientais, dado que ele possui características físicas e químicas nocivas ao ambiente, sendo considerado um material altamente poluidor (MORELL *et al.*, 2018).

A fertirrigação consiste na técnica de aplicar fertilizantes via água de irrigação, dessa forma, pesquisas usam a vinhaça *in natura* diretamente nas culturas de cana, com quantidade pré estabelecida, já que o uso exagerado desse resíduo pode contaminar lençóis freáticos com potássio, salinizar o solo, lixiviar metais e sulfatos, liberar mau cheiro e gases do efeito estufa como o óxido nitroso (MARAFON *et al.*, 2020). No trabalho de Medina *et al.* (2020), o reuso da vinhaça na produção de mudas pré brotadas (MPB) de cana-de-açúcar demonstrou ser uma maneira de reduzir custos no fornecimento de nutrientes às plantas, já que a vinhaça propicia a melhoria da fertilidade do solo, ao fornecer água, macro e micronutrientes e aumentar os teores de matéria orgânica no solo.

Outra destinação é a produção de biogás e energia elétrica. Araújo e Oliveira (2020) tiveram como objetivo em seu trabalho, analisar a viabilidade econômico-financeira do uso de vinhaça para geração de eletricidade, os resultados apontam para a segurança do sistema elétrico nacional com a complementariedade da energia hidráulica, descentralização de produção e consequente mitigação da emissão de gases do efeito estufa. A digestão anaeróbia da vinhaça pode gerar uma quantidade considerável de biogás que representa melhoras nos indicadores de balanço energético e emissões de gases de efeito estufa evitadas (SILVA NETO; GALLO; NOUR, 2019).

Aplicações na construção civil também são vistas na literatura. Nehring *et al.* (2020) analisaram a influência da vinhaça na hidratação de pastas de cimento, foram analisados a consistência, tempo de pega e variação de temperatura na hidratação, os resultados apontaram que a proporção de 25% de vinhaça e 75% de água acarreta em menor variação de temperatura e aumento nos tempos iniciais e finais de pega, enquanto quantidades maiores não causam os mesmos benefícios. Toselho *et al.* (2021) fabricaram e caracterizaram tijolos ecológicos utilizando como matriz o argissolo e o latossolo, como aglomerante, materiais recicláveis da coleta seletiva urbana (PET e EPS), reboco descartado pela construção civil e como agente hidratante a vinhaça, os resultados mostraram que houve aumento da resistência mecânica do material, porém, houve aumento na absorção de água pelos tijolos, o que não atende a NBR que dispõe sobre o tijolo maciço de solo-cimento.

A torta de filtro é o subproduto da filtração mecânica durante a fabricação do açúcar e do etanol. Produzida em proporções próximas a 40 kg por tonelada de cana, é originada da mistura do lodo de decantação e do bagaço moído (BERNARDINO *et al.*, 2018). Um dos usos mais comuns desse subproduto é como fertilizante em substratos. Andrade *et al.* (2018) avaliaram a combinação de diferentes doses de nitrogênio e torta de filtro no desenvolvimento inicial de MPB de cana-de-açúcar e, com os resultados da biometria da planta, concluíram que a combinação de doses de até 60 ton ha⁻¹ de torta de filtro com 100 kg ha⁻¹ de N melhora o desenvolvimento do cultivar CTC 9003. O uso também pode ser feito em outras culturas, como Soares *et al.* (2020) que avaliaram o crescimento e o desenvolvimento de mudas de quiabeiro produzidas com diferentes proporções de torta de filtro como substrato; com base nos resultados, eles recomendam a utilização na proporção de 55 % de torta de filtro e 45 % de solo, já que as mudas de quiabo apresentaram melhor desenvolvimento nessas condições.

Um novo uso para a torta de filtro é tratado por Pérez *et al.* (2021) que desenvolveram um trabalho com o objetivo de utilizar esse subproduto como antiespumante na produção de leveduras, já que durante o processo de fermentação em que são obtidas, a formação de espuma é um grande problema. Essa alternativa busca reduzir os custos da produção de leveduras que necessita da importação de antiespumantes comerciais, os resultados obtidos entregam um produto eficaz para supressão de espuma. Outro uso importante para a torta de filtro é sua aplicação na produção de cera, material que pode ser uma alternativa para vegetais, animais e ceras sintéticas, já que atende aos critérios de qualidade estabelecidos pela indústria e ser um importante insumo para alimentos, produtos químicos, farmacêuticos, cosméticos e de limpeza (RABELO; COSTA; ROSSEL, 2015).

Por fim, há o BCA, um subproduto fibroso gerado após a extração do suco dessa gramínea, sua composição compreende aproximadamente 50 % de celulose, 25 % de hemicelulose e 25 % de lignina (Figura 2, pág. 23) e chega a atingir entre 270 e 290 kg de bagaço por tonelada de cana processada (ALCARDE, 2009).

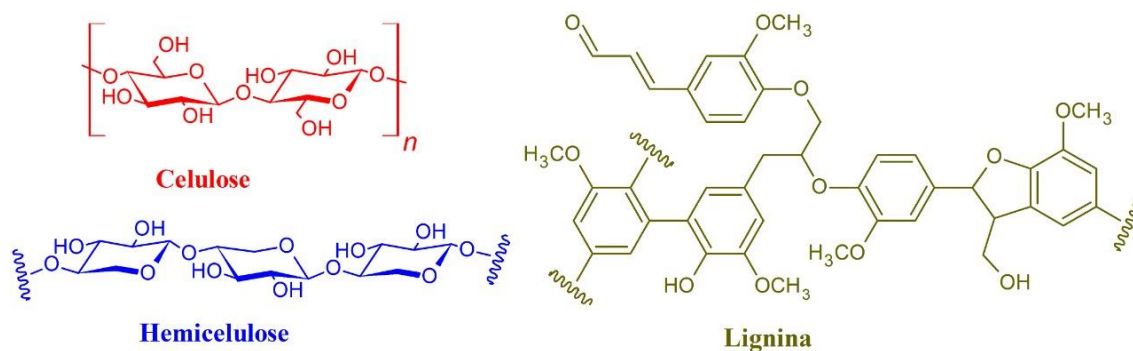


Figura 2– Fórmulas estruturas da celulose, lignina e hemicelulose

Autor, 2021.

Dentre as formas de aproveitar o BCA, encontra-se a produção de energia elétrica por meio da combustão. Oliveira *et al.* (2021) avaliaram o incremento de biomassa advinda da implantação de irrigação nos canaviais brasileiros, estimaram o potencial de cogeração e o impacto na matriz energética do país, concluindo que a expansão da área irrigada de cana-de-açúcar contribui com o aumento da produção de bagaço e geração bioenergética do Brasil. A biomassa é a terceira maior fonte de energia para conversão em eletricidade, sendo BCA o insumo mais relevante (CORREIA *et al.*, 2020). Visto isso, os autores avaliaram as características físico-químicas e energéticas do bagaço estocados por três anos a céu aberto e destacaram que o material possui potencial significativo para cogeração de energia em agroindústrias. A viabilidade da bioeletricidade a partir do bagaço, pontas e palha da cana em larga escala foi constatada por Souto *et al.* (2018) que concluíram que a bioeletricidade deve ser encarada como um dos principais produtos do setor sucroalcooleiro, devido ao grande potencial de cogeração e autossuficiência das usinas.

O bagaço pode ser utilizado também para produção de etanol de segunda geração (2G). Dionísio *et al.* (2021) propõem a promoção da fermentação do etanol por meio da utilização completa dos açúcares fermentáveis liberados do BCA, essa estratégia melhorou o desempenho geral com um aumento substancial na produtividade do etanol. Um dos principais motivos das pesquisas em produção de etanol de segunda geração é a possibilidade de sua execução não necessitar aumento da área de plantio. Visando compreender a dinâmica desse mercado, Lopes, Santos; Costa (2017) avaliaram a distribuição de patentes do uso do bagaço ao longo do tempo, esse levantamento permitiu apontar que a tecnologia de produção de etanol a partir do BCA é recente em todo o mundo. Esse subproduto tem destaque como fonte de carbono para crescimento de microrganismos; baseado nisso, Catelan e Pinotti (2019) fizeram uma revisão

bibliométrica sobre produção de celulase por *Aspergillus niger* no BCA, identificando o aumento de publicações científicas sobre produção de celulases de menor custo para geração de etanol 2G.

No setor da construção civil, para simular as possíveis reduções de gases de efeito estufa, a cinza do BCA foi utilizada para substituir parcialmente o cimento Portland em habitações de interesse social do Programa “Minha Casa Minha Vida” em Minas Gerais, os resultados apontaram que essa substituição além de reduzir a geração de custos, reduz os patamares de emissões de CO₂ no ambiente (REZENDE *et al.*, 2017). Amaral; Lages (2019) objetivaram avaliar a adição de fibras do BCA em compósitos cimentícios e verificar a resistência através dos ensaios de compressão uniaxial, eles constataram que os materiais que apresentavam fibras de bagaço tiveram baixa resistência à compressão, mas benefícios como redução da densidade e do uso de cimento. Já em Filho; Martins (2017), a substituição de 25 % do agregado miúdo por cinza pesada do bagaço de cana e 2,5 % de cimento Portland por cinza leve, atendeu às recomendações para produção de concreto utilizado na confecção de blocos para pavimentação.

A possibilidade do uso do bagaço como adsorvente também tem sido explorada na literatura. Xavier *et al.* (2021) avaliaram o potencial do bagaço como adsorvente natural de corante têxtil sintético, o material mostrou-se atraente na remoção do corante direto Tupy® cor bordô 16, com resultados ainda melhores quando o adsorvente foi tratado com HCl. O BCA também é eficiente na adsorção do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), ao investigar o uso do compósito de polipirrol e bagaço, notou-se a eficiência para remoção do herbicida 2,4-D em efluentes (KHAN *et al.*, 2021). Ao modificar quimicamente o BCA com ácido sulfúrico (1,0 mol L⁻¹), Paz, Garnica; Curbelo (2018) avaliaram sua capacidade de reter íons metálicos de chumbo, os resultados mostraram que a temperatura de 30 °C proporcionou uma maior adsorção.

Outra forma de valorização do BCA é na produção de biocarvão para uso agrícola, já que tanto a matéria-prima como seu biocarvão apresentam características propícias para este fim (SOUZA *et al.*, 2021). A natureza porosa e a propriedade de adsorção desse material têm o potencial de imobilizar elementos e proporcionar um ambiente ideal para a biota do solo, que ajuda no desenvolvimento das plantas; assim, ao produzir e avaliar o uso do BBT no plantio de pimentas e o crescimento microbiano no meio, Ullah *et al.* (2020) concluíram que o uso de biocarvão na agricultura pode ser eficaz para a fertilização do solo, aumentando, também, o

crescimento de vegetação e bactérias. A resposta da biomassa microbiana e a atividade enzimática na rizosfera da cultura de trigo foram avaliadas por Irfan *et al.* (2019). Os autores utilizaram BBT associado ao fertilizante de nitrogênio em um estudo de campo, durante dois anos, e notaram que houve um aumento no carbono orgânico do solo, N inorgânico e umidade, enquanto a salinidade e a densidade aparentes do solo reduziram. Irfan *et al.* (2019) destacam que o BBT pode ser utilizado como um condicionador para melhorar a saúde, o estado nutricional e as funções biológicas do solo calcário de regiões áridas.

2.2 Biocarvão e outros condicionadores de solo

Entende-se por condicionadores, produtos que promovem melhorias nas propriedades físicas, químicas ou nas atividades biológicas do solo, já que possuem quantidades relevantes de matéria orgânica, ácidos húmicos e fúlvicos, podendo ser utilizados na restauração da fertilidade de solos degradados (REDI, 2016).

As áreas de canaviais são usadas continuamente no Brasil, com isso, produtores recorrem à adubação e correção do solo constantemente para evitar a exaustão do meio. Visto isso, os principais condicionadores adotados buscam manter o NPK, cobre, zinco, manganês e boro no solo. Pesquisas mostram que o setor aplica vinhaça (MARADIAGA-RODRIGUEZ *et al.*, 2018), torta de filtro (AQUINO *et al.*, 2018), ácido húmico (ROSATO; BOLONHEZI; FERREIRA, 2010) e ureia (MARQUES PIRES *et al.*, 2018) para essa finalidade; porém, a procura por novos condicionadores é recorrente, visto que o custo com insumos é um dos mais altos no preparo do plantio de canaviais (ROSA, 2018).

Na busca por solos ricos em nutrientes, a Terra Preta de Índio (ou Terra Preta Arqueológica), alvo de pesquisas em todo o mundo, é um solo formado pela queima e decomposição de resíduos orgânicos gerados por povos pré-colombianos da Bacia Amazônica, possuindo como característica relevante, um alto teor de carbono pirogênico e alta fertilidade (PANDEY *et al.*, 2020; MADARI *et al.*, 2006). Desse modo, esse solo antropogênico exemplifica como o biocarvão possui efeito benéfico para a fertilidade do solo, podendo ser adotado para o condicionamento dos mesmos (PANDEY *et al.*, 2021).

O biocarvão surge da transformação de uma biomassa, material orgânico de origem animal ou vegetal, em um material rico em carbono por meio de rotas termoquímicas (SAKHIYA; ANAND; KAUSHAL, 2020), assim dizendo, pela pirólise. Sobre a biomassa utilizada para produção do biocarvão, a literatura é diversa, fontes como madeira (YADAV *et*

al., 2022), resíduos de café (ZHANG *et al.*, 2022), coco (WANG *et al.*, 2021) e arroz (PIERRI *et al.*, 2022) são adotadas, porém nem todo biocarvão promoverá os mesmos efeitos no solo, devido às características da biomassa e as condições da pirólise.

A pirólise é um processo físico-químico que aquece a biomassa em diferentes temperaturas para ocorrer sua decomposição, seja em atmosfera isenta ou com baixas concentrações de oxigênio. Como resultados desse procedimento, tem-se os produtos em uma porção sólida e rica em carbono (biocarvão), uma fração volátil composta por gases e uma líquida denominada bio-óleo (VIEIRA *et al.*, 2014).

Dependendo do método de pirólise utilizado e das condições adotadas, ocorrem variações nos produtos finais obtidos, ou seja, as proporções de biocarvão, bio-óleo e gases são influenciados por parâmetros como temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e pressão. Por tanto, existem quatro tipos de pirólise: (1) Carbonização ou pirólise lenta que objetiva a maior produção de carvão utilizando baixas taxas de aquecimento (menos de 2 °C/s), baixa temperatura (inferior a 500 °C) e tempos elevados de residência dos produtos, podendo ser minutos, horas ou dias; (2) Pirólise rápida, com foco na produção de bio-óleo; (3) Pirólise instantânea ou pirólise de flash, com velocidades de aquecimento elevadas (maiores que 1000 °C/s) e tempos de residência menores (dos sólidos, menores que 1 s), utilizando partículas bem pequenas do material a ser pirolisado para que ocorra uma maior transferência de calor (PARADELA, 2012); e (4) Pirólise analítica, uma técnica para caracterizar um determinado material por meio das reações de degradação química, induzidas pela energia térmica na ausência de oxigênio, o que resulta um conjunto de pequenas espécies moleculares que são relacionadas à composição da amostra original (VIEIRA *et al.*, 2014).

Uma vez misturado ao solo, o biocarvão auxilia em uma maior retenção de água, menor lixiviação de nutrientes, aumento da atividade micorrízica, mudanças na densidade da área superficial, distribuição e tamanho dos poros e das partículas do sistema e pH, o que resulta no aumento da produtividade de culturas (WARNOCK *et al.*, 2007; NÓBREGA, 2011).

Em Ginebra *et al.* (2022), por exemplo, foi apresentado um experimento de campo de um ano para avaliar os impactos de biocarvões de esterco e resíduos de madeira nas propriedades do solo, na produtividade de sorgo e na emissão de gases do efeito estufa em campos agrícolas corrigidos com o material. Eles associaram o aumento da produção de sorgo ao potencial de calagem do biocarvão e a introdução de fertilizantes; o carbono total do solo também aumentou

e foi perceptível o potencial que o biocarvão tem em mitigar as mudanças climáticas por reduzir as emissões de N_2O do solo e promover o armazenamento de C no mesmo.

Guarnieri *et al.* (2021) produziram e caracterizaram um biocarvão de resíduos de coco para avaliar como ele pode alterar a capacidade de retenção de água e nutrientes em solos de textura arenosa. Como resultados, a retenção de água, o pH, a CTC, a saturação de bases e as concentrações de P e K aumentaram com o aumento da concentração de biocarvão no solo. Tais resultados demonstraram o potencial do biocarvão de coco para alcançar os objetivos definidos pelos autores.

O uso do biocarvão para remediar solos contaminados também vem sendo estudado na literatura. Tang *et al.* (2022) conduziram um experimento de campo para explorar os efeitos do biocarvão na remediação de solo contaminado com Cd e na melhoria da qualidade do ambiente do solo. Os pesquisadores notaram melhoras nas propriedades físicas e químicas do meio, a redução da biodisponibilidade de Cd, o aumento das atividades de catalase, urease, fosfatase alcalina e sacarase em diferentes graus e a estabilidade do solo, indicando o potencial do biocarvão para melhorar a qualidade ambiental.

As funções do solo, a fertilidade e a abundância microbiana podem ser alteradas de várias maneiras por influência do biocarvão. Ahmad *et al.* (2022) revelaram em sua pesquisa, por meio da caracterização do biocarvão, parâmetros fisiológicos de plantas, análise de solo e comunidades microbianas, que há aumento de nutrientes no meio, bem como abundância, complexidade e diversidade de microrganismos e aumento da biomassa vegetal no ambiente que contém biocarvão.

Vistos os benefícios do biocarvão no solo, é possível destacar características do material que promovem as qualidades de corretivo do solo e de ferramenta para o sequestro de C, como a composição da matéria-prima originária do biocarvão, em especial a porcentagem total da composição da fração mineral, as condições do processo de pirólise, o tamanho e o sistema de distribuição das partículas do biocarvão e as propriedades do solo e as condições ambientais locais (JOSEPH *et al.*, 2010).

2.3 Microrganismos do solo

O solo é um ambiente cheio de vida e os organismos que o habitam são essenciais para manutenção da sustentabilidade e da funcionalidade do sistema edáfico, pois desempenham

funções como a degradação de compostos orgânicos que implica na ciclagem de nutrientes, na fixação biológica de nitrogênio, no auxílio às plantas na absorção de nutrientes com a formação de micorrizas, na proteção de plantas contra doenças e pragas, na solubilização de fosfatos, no fornecimento de hormônios vegetais, na pedogênese, nos processos biotecnológicos (como biocontrole, biorremediação e alimentação) e muitas outras funções (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

A fração viva do solo é bastante diversa, logo os organismos podem ser divididos em grupos como os procarióticos (bactérias e arqueias), os eucarióticos (destaque para os fungos), os insetos, os nematoides, os protozoários, as algas, as oligoquetas (minhocas) e, até mesmo, os vírus (BRADY; WEIL, 2013). Os grupos-chave principais de organismos do solo podem ser sintetizados na Figura 3 (pág. 29), sendo a presença ou abundância destes organismos usada para correlacionar à qualidade do solo, já que cada espécime possui diferentes características fisiológicas e ecológicas. Visto a importância destes para todo um ecossistema, é crucial que o solo possua características que favoreçam sua permanência e multiplicação no meio.

Contemplando a esfera micro, tem-se o microbioma, termo utilizado para representar o conjunto de microrganismos que habitam um hospedeiro ou um ambiente (BOON *et al.*, 2014). No solo, essa microbiota realiza serviços ecossistêmicos imprescindíveis para manutenção e sobrevivência das comunidades vegetais e animais, e está sob fatores que regem sua diversidade no ambiente. O solo é um sistema biológico dinâmico, heterogêneo e descontínuo, com uma grande variabilidade na estrutura, composição e organização dos agregados (Figura 4, pág. 29), o que implica no surgimento de micro habitats para a colonização dos microrganismos, aqueles diferem entre si quanto às características físicas, químicas e disponibilidade de nutrientes devido à variação do tempo e do espaço (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

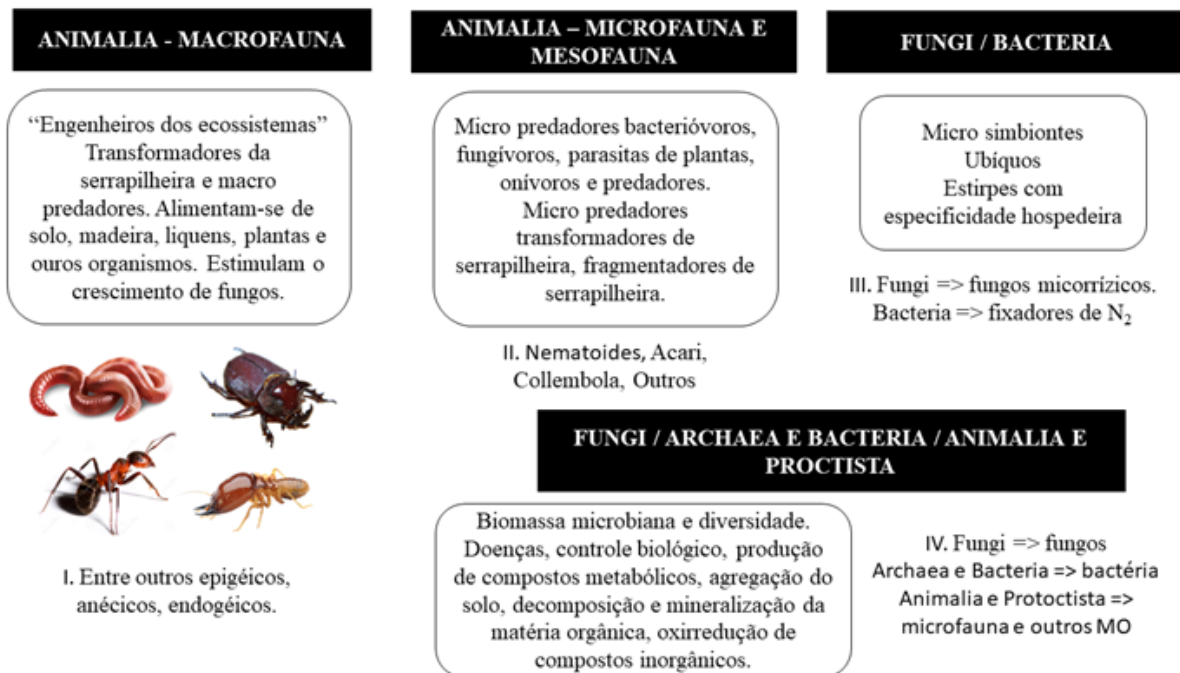


Figura 3 – Grupos-chave principais de organismos do solo. Adaptado de Moreira; Siqueira, 2006

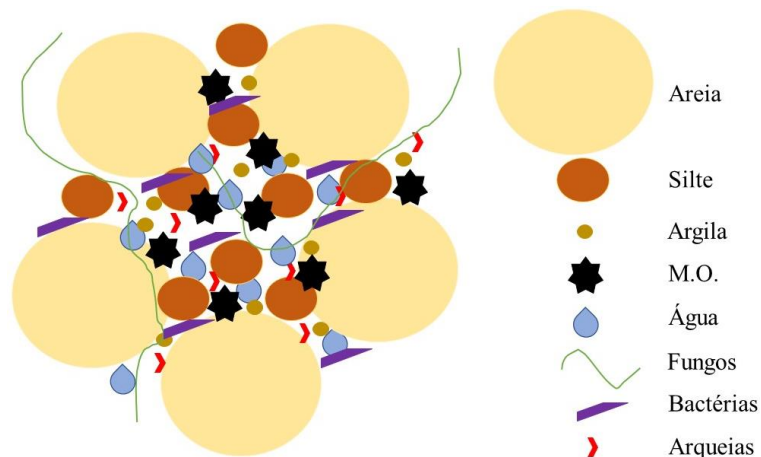


Figura 4 – Esquema de um agregado de solo. Adaptado de Cardoso; Andreote, 2016

Para que haja certa diversidade microbiana no solo, há um conjunto de fatores que tornam o ambiente adequado para o desenvolvimento e estruturação das comunidades. Dentre os principais fatores bióticos, encontram-se a genética microbiana e as interações ecológicas entre os microrganismos, como as relações simbióticas mutualísticas, o comensalismo, o antagonismo, a predação, o parasitismo e a competição (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Aos

fatores abióticos atribuem-se:

i) Atmosfera do solo que corresponde à porcentagem, à composição e à disponibilidade de gases usados no metabolismo microbiano (principalmente o oxigênio);

ii) Temperatura que influencia diretamente acelerando ou retardando a ocorrência dos processos metabólicos microbianos;

iii) Água higroscópica, capilar e gravitacional que participa da difusão de nutrientes, motilidade microbiana e influencia no pH, no potencial redox, na temperatura e na aeração do solo;

iv) pH que afeta a disponibilidade de nutrientes e está fortemente relacionado à diversidade e à funcionalidade microbiana;

v) Potencial redox que é uma medida da tendência do solo ganhar ou perder elétrons, servindo como um indicador bioquímico do processo metabólico;

iv) Fontes nutricionais como o carbono, o nitrogênio e os nutrientes minerais (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Mn, Cu, Mo, Co, Na, Cr, Ni, Se, W e V) constituintes essenciais para o metabolismo e a multiplicação dos organismos;

vii) Matéria orgânica que influencia as propriedades do solo, a disponibilidade de nutrientes e regula a ciclagem e a estabilização do carbono, tendo influência direta na atividade biológica do solo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e produção do biocarvão

A coleta da biomassa foi feita na Usina de Açúcar e Álcool Cerradão, situada no município de Frutal-MG, no dia 04 de novembro de 2020. O bagaço, resíduo fibroso do colmo da cana-de-açúcar resultante do processo de moagem, foi posto para secagem em temperatura ambiente por 72 h. Posteriormente, o material foi armazenado em sacos plásticos. O BCA foi triturado em Picador/Triturador Forrageiro (TRF 90, TRAPP, Jaraguá do Sul, Brasil) e passado em peneira com abertura de 2 mm. Em seguida, para produção do BBT, foi construído um forno para pirólise a partir de um tambor de aço de 200 L (62 cm x 62 cm x 90 cm) com tampa removível e quatro latas de aço menores, duas de 18 L (232 mm x 232 mm x 348 mm) e duas de 3,6 L (ø 166 mm x 188 mm), com furos na tampa, seguindo a metodologia de forno de duplo tambor adaptada (DENNIS, 2011; O'TOOLE *et al.*, 2013). Com isso, cerca de 6 kg de BCA foram introduzidos no forno, alimentado com material lenhoso, para pirólise por 1 h. Conforme Trazzi (2014), o material retirado da fornalha foi imediatamente imerso em água para evitar a combustão completa, seco em temperatura ambiente por 48 h e em estufa a 60 °C por 72 h. O biocarvão obtido foi codificado como BBT e o rendimento gravimétrico (R %) foi determinado por meio da divisão da massa seca do biocarvão pela massa seca do BCA (Equação 1).

$$Rendimento (\%) = \left(\frac{Massa\ do\ BBT}{Massa\ do\ BCA} \right) \cdot 100 \quad (Eq. 1)$$

3.2 Caracterização do biocarvão

3.2.1 Determinação do pH

A determinação do pH foi realizada em solução de cloreto de cálcio (CaCl₂) conforme metodologia apresentada no manual de métodos de análise de solo da EMBRAPA (TEIXEIRA, *et al.* 2017). Para tanto, 1 g do BBT foi transferido para recipiente de vidro e 10 mL da solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ foram adicionados, esse procedimento foi feito em triplicata. Posteriormente, as amostras foram agitadas em mesa agitadora por 10 min a 220 rpm. Em seguida, foram deixadas em repouso por 30 min e os valores de pH em suspensão foram medidos com auxílio de pHmetro (DM22, Digimed, São Paulo, Brasil).

3.2.2 Determinação da condutividade elétrica (CE)

Para determinação da CE, 0,5 g do BBT foi colocada em frasco de vidro com tampa, posteriormente foram adicionados 10 mL de água deionizada; esta etapa foi feita 5 vezes. Os frascos foram tampados e colocados em mesa agitadora por 30 s a 220 rpm, após a agitação foram deixados em repouso por 30 min. Em seguida, sem agitar, foram medidas as CE em condutivímetro de bancada (W12D, BEL Engineering, Monza, Itália).

3.2.3 Teor de materiais voláteis

O forno mufla foi previamente aquecido a 950 °C e 1 g do BBT foi colocado em cadinho tampado e levado à porta da mufla por dois minutos para aclimação. Posteriormente, o cadinho foi inserido no interior da mufla onde permaneceu por nove minutos, o procedimento foi feito em triplicata. Em seguida, as amostras foram colocadas em dessecador por 30 min e determinou-se a massa de cada amostra em balança analítica. O teor de materiais voláteis do BBT foi calculado utilizando a equação 2.

$$MV (\%) = \frac{M_s - M_f}{M_s} 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: MV = Teor de materiais voláteis (%); M_s = Massa inicial da amostra (g); e M_f = Massa final da amostra (g).

3.2.4 Teor de cinzas

1 g do BBT em cadinho de porcelana foi levado a um forno mufla a 600 °C por um período de 6 h até a sua completa calcinação. Em seguida, as amostras foram colocadas em dessecador por 30 min e determinou-se a massa de cada amostra em balança analítica, o procedimento foi feito em triplicata. O teor de cinzas do BBT foi calculado utilizando a equação 3.

$$CZ (\%) = \frac{M_r}{M_s} 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que: CZ = Teor de cinzas no biocarvão (%); M_s = Massa da amostra (g); M_r = Massa do resíduo – cinzas (g).

3.2.5 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado de modo indireto utilizando a equação 4.

$$CF (\%) = 100 - (CZ + MV) \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: CF = Teor de carbono fixo (%); CZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); e MV = Teor de materiais voláteis (%).

3.2.6 Área superficial pelo método de adsorção do corante azul de metileno (AM)

Um total de 100 mg do BBT foram transferidos para Erlenmeyer, em seguida adicionou-se 25 mL de solução aquosa de AM na concentração de 50,0 mg L⁻¹. Esse procedimento foi repetido para as concentrações de 100,0; 200,0; 400,0; 600,0; 800,0 e 1000 mg L⁻¹. As misturas foram mantidas sob agitação por 24 h, posteriormente, foram filtradas em filtro Whatman de 0,45 µm, e os filtrados foram diluídos e transferidos para cubetas de vidro para determinação das absorvâncias em 665 nm. Utilizou-se uma curva analítica para monitorar as concentrações finais de azul de metileno em cada solução. Para o cálculo do azul de metileno adsorvido foi utilizada a equação 5.

$$q = \frac{(C_i - C_e) \cdot V}{m} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que: q é a capacidade adsortiva expressa em mg g⁻¹; C_i e C_e são as concentrações inicial e final na fase líquida (mg L⁻¹), respectivamente, m é a massa de biocarvão (g) e V é o volume da solução (L).

A capacidade adsortiva máxima da monocamada do AM (q_m), foi determinada pelo inverso do coeficiente angular da equação do gráfico da concentração de equilíbrio (C_e) versus concentração de equilíbrio por capacidade adsortiva (C_e/q).

Para o cálculo da área superficial estimada pela adsorção de AM (S_{AM}), seguiu-se o método proposto no trabalho de Stavropoulos e Zabaniotou (2005), utilizando a equação 6.

$$S_{AM} = q_m \times S_{AM}^0 \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que: S_{AM}⁰ é a área de superfície de AM (1,93 m² mg⁻¹).

3.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As morfologias do BBT e do BCA foram analisadas por meio da MEV em um equipamento de baixo vácuo (TM 3000, Hitachi, Tóquio, Japão) com detectores de elétrons retroespalhados (BSE) e aceleração variável (5kV e 15kV).

3.2.8 Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRXED)

A composição química do BBT foi determinada em um espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRXED; EDX-720, Shimadzu, Quioto, Japão). As condições experimentais empregadas foram: ar sintético e colimador de 10 mm.

3.2.9 Análise térmica

As curvas de Termogravimetria (TG) do BBT e do BCA foram obtidas usando o analisador termogravimétrico (STA 7300, Hitachi, Tóquio, Japão), com análises de 35 a 1000 °C, a 10 °C/min, sob atmosfera de nitrogênio. As análises foram feitas com 2,994 mg do BBT e 3,675 mg do BCA.

3.2.10 Análise do lixiviado do biocarvão por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ^1H)

Um total de 100 mg BBT foi submetido à extração com 1,0 mL de solução tampão de KH_2PO_4 em D_2O (pH 6,0), contendo 0,01 % (m/v) de 3-trimetilsilil-2,2,3,3-propionato- d_4 de sódio (TSP- d_4) como referência interna. Após a combinação com o solvente, a amostra foi agitada por 1 min em vórtex, colocada em banho de ultrassom por 20 min e centrifugada a 17.000 rpm. 600 μL do sobrenadante foi transferido para tubo de RMN com diâmetro de 5 mm. O espectro de RMN de ^1H foi obtido em espectrômetro (Avance DRX400, Bruker, Karlsruhe, Alemanha) a 300 K, com janela espectral de 16 ppm, número de pontos 32k, tempos de aquisição (AQ) e recuperação (d1) de 2,0 s. Para o processamento foi utilizado o alargamento de linha de 0,3 Hz, anterior à transformada de Fourier. A fase e linha de base foram corrigidas automaticamente utilizando o programa TopSpin 4.0.9 e, por fim, o espectro foi calibrado pelo sinal do TSP- d_4 em 0.00 ppm. As identificações dos compostos foram realizadas pelo emprego do programa Chenomx NMR Suite 9.0 (Chenomx Inc., Edmonton, Canadá), que comparou os espectros obtidos com aqueles de substâncias puras que estavam no banco de dados do programa.

3.3 Efeito do biocarvão nas propriedades físico-químicas do solo de canavial

3.3.1 Coleta do solo de canavial

O solo utilizado no experimento foi coletado em uma área de canavial no dia 01 de fevereiro de 2021, na profundidade de 0 a 25 cm, na cidade de Frutal-MG (19°59'04.8" S; 49°10'31,1" O), profundidade em que é possível encontrar uma maior diversidade de microrganismos (Figura 5). Amostras do material foram encaminhadas para o Laboratório de Físico-Química da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) e analisados o pH, umidade atual e granulometria, conforme Teixeira *et al.* (2017).



Figura 5 – Área de coleta do solo (19°59'04.8" S; 49°10'31,1" O).

Autor, 2021.

3.3.2 Caracterização de propriedades físico-químicas do solo

Para medir o pH da solução do solo, 10 g do material coletado foram transferidos para um béquer de 50 mL. Adicionou-se 25 mL de água destilada e realizou-se a homogeneização por aproximadamente 1 min. A mistura ficou em repouso por 1 h e, em seguida, mediu-se o pH com o pHmetro (DM22, Digimed, São Paulo, Brasil). Já a umidade do solo foi avaliada a partir do aquecimento de 30 g do solo em cápsulas de porcelana, que foram colocadas em estufa a 105 °C por 24 h. Em seguida, as capsulas foram mantidas em dessecador com sílica indicadora de umidade, até que atingissem a temperatura ambiente e pesadas novamente. O cálculo da umidade atual gravimétrica (kg.kg⁻¹) foi feito realizando as substituições devidas na equação 7.

$$Ug = \left(\frac{a-b}{b} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que: U_g = Umidade gravimétrica (kg.kg^{-1}); a = Massa amostra úmida (kg) e b = Massa amostra seca (kg).

Para obter a granulometria do solo, primeiramente as amostras foram destorroadas e colocadas em local seco e arejado, expostas ao sol, até secagem completa para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Uma porção de 10 g desse solo foi transferido para cápsulas de porcelana e aquecido a 105 °C por 24 h em estufa. Os cálculos para determinação de umidade residual e fator de correção de massa do solo foram feitos conforme equações 8 e 9.

$$Ur = \left(\frac{a-b}{b} \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

$$f = \frac{a}{b} \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que: Ur = Umidade residual em kg.kg^{-1} ; f = fator usado para correção da massa de solo, utilizado para a massa de solo seca nas determinações em laboratório com a utilização de TFSA; a = massa da amostra seca ao ar, em g e b = massa da amostra seca em estufa a 105 °C, em g.

Posteriormente, 20 g de TFSA de cada amostra foram transferidos para Erlenmeyers de 250 mL e misturados à 10 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol.L^{-1} . Todos os frascos foram colocados em mesa agitadora e submetidos à rotação de 50 rpm por 16 h. Em seguida, as amostras passaram por peneiras de malha 0,053 mm e o material retido foi lavado com água destilada até atingir o volume de 1 L em cada proveta. As areias retidas nas peneiras foram transferidas para béqueres e submetidas à secagem em estufa por 24 h à 105 °C. Após secagem e resfriamento, foram determinadas as frações de areia grossa e areia fina utilizando peneira de 0,212 mm. A fração retida na peneira constitui a areia grossa, já a areia fina, passou pela peneira, ambas frações foram pesadas.

Para determinar silte e argila, em uma proveta de 1000 mL foi preparada a prova controle, adicionando-se 10 mL de NaOH 1 mol.L^{-1} e completando o volume com água destilada. Com uma pipeta volumétrica, coletou-se 25 mL da solução, transferiu-se para um béquer de 50 mL e secou-se em estufa por 24 h à 105 °C. Após a secagem e resfriamento, o béquer foi pesado. Todas as soluções contidas nas provetas, inclusive a prova controle foram submetidas à aferição de temperatura da suspensão, utilizando um termômetro. Em seguida, todas as suspensões foram agitadas vigorosamente durante 1 min com bastões de vidro, para coleta de 25 mL do sobrenadante. Da mesma forma, as soluções coletadas foram colocadas em

béqueres de 50 mL, e secas em estufa por 24 h à 105 °C. Aguardou-se o tempo de sedimentação da fração silte, seguindo a temperatura aferida da solução, conforme tempo descrito (Tabela 1).

Tabela 1 – Tempo de sedimentação calculado para a fração silte ($0,002 \text{ mm} < \varnothing < 0,05 \text{ mm}$) em função da temperatura da suspensão para a profundidade de 5 cm e para solos com densidade de partículas média de $2,65 \text{ kg.dm}^{-3}$, em determinação efetuada ao nível do mar

Temperatura (°C)	Tempo de sedimentação a 5 cm (Minutos)
15	263
16	256
17	250
18	244
19	238
20	232
21	226
22	221
23	216
24	211
25	206
26	201
27	197
28	193
29	189
30	185

Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2017).

Passado o tempo de sedimentação da fração silte, 25 mL foram retirados das soluções sobrenadantes, em triplicata, nos 5 cm superficiais da proveta. As alíquotas foram transferidas para béqueres e levadas à estufa de secagem à 105 °C durante 24 h. Após resfriamento em dessecador, determinou-se a massa contida em cada béquer. Os cálculos foram efetuados, conforme as equações 10-14.

$$S_m = \left(\frac{m_{af} \times f}{m_i} \right) + \left(\frac{(m_{at} - m_{af}) \times f}{m_i} \right) + \left(\frac{(m_{sa} - m_{ar}) \times f}{m_i \times R_v} \right) + \left(\frac{(m_{ar} - m_{br}) \times f}{m_i \times R_v} \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que: S_m = Somatório da massa das frações, em g; m_{af} = Massa de areia fina, em g; m_{at} = Massa de areia total, em g; m_{sa} = Massa de silte + argila, seca em estufa, em g; m_{ar} = Massa de argila, seca em estufa, em g; m_{br} = Massa do controle, seca em estufa, em g; m_i = Massa inicial da amostra, em g; R_v = Razão do volume pipetado para o volume total da proveta e f = fator de correção de umidade para a massa inicial.

$$T_{af} = \left(\frac{m_{af} \times f}{m_i} \right) \times \left(\frac{1000}{S_m} \right) \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que: T_{af} = concentração de areia fina, em g.kg⁻¹; m_i = massa inicial da amostra, em g; m_{af} = massa de areia fina, em g; f = fator de correção de umidade para a massa inicial e S_m = Somatório da massa das frações, em g.

$$T_{ag} = \left(\frac{(m_{at} - m_{af}) \times f}{m_i} \right) \times \left(\frac{1000}{S_m} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que: T_{ag} = concentração de areia grossa, em g.kg⁻¹; m_i = massa inicial da amostra, em g; m_{at} = Massa de areia total, em g; m_{af} = Massa de areia fina, em g; f = fator de correção de umidade para a massa inicial e S_m = Somatório da massa das frações, em g.

$$T_s = \left(\frac{(m_{sa} - m_{ar}) \times f}{m_i \times R_v} \right) \times \left(\frac{1000}{S_m} \right) \quad (\text{Eq. 13})$$

Em que: T_s = concentração de silte, em g.kg⁻¹; m_i = massa inicial da amostra, em g; m_{sa} = Massa de silte + argila, seca em estufa, em g; m_{ar} = Massa de argila, seca em estufa, em g; R_v = Razão do volume pipetado para o volume total da proveta; f = fator de correção de umidade para a massa inicial e S_m = Somatório da massa das frações, em g.

$$T_{arg} = \left(\frac{(m_{ar} - m_{br}) \times f}{m_i \times R_v} \right) \times \left(\frac{1000}{S_m} \right) \quad (\text{Eq. 14})$$

Em que: T_{ar} = concentração de argila, em g.kg⁻¹; m_i = massa inicial da amostra, em g; m_{ar} = Massa de argila, seca em estufa, em g; m_{br} = Massa do controle, seca em estufa, em g; R_v = Razão do volume pipetado para o volume total da proveta; f = fator de correção de umidade para a massa inicial e S_m = Somatório da massa das frações, em g.

3.3.3 Experimento em casa de vegetação

As mudas pré brotadas (MPB) de cana-de-açúcar da cultivar CTC 9001 com 45 dias de idade foram obtidas em Frutal-MG e plantadas em recipientes plásticos de 3 L contendo uma mistura de solo do canavial e BBT. O experimento foi realizado em blocos inteiramente casualizados, com fotoperíodo claro:escuro de 12 h. Foram utilizados cinco tratamentos no solo, contendo as respectivas doses do biocarvão em percentagem de massa (% m/m): 0,0 (controle - N); 1,0 (1); 3,0 (3); 5,0 (5) e 5,0 (CC) de um biocarvão comercial (Biochar®), visto que segundo Rezende *et al.* (2011) “estima-se que a quantidade ótima de biochar nos solos para agricultura varie entre 1 e 5%”. Esse experimento foi repetido 5 vezes, em períodos de 30 e 60 dias para avaliar a biometria das plantas, totalizando 50 vasos (Figura 6).

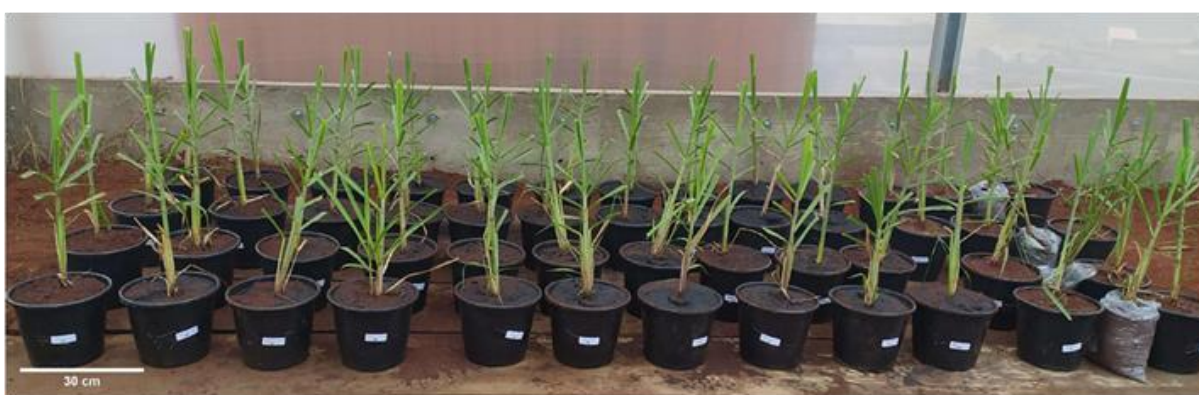


Figura 6 – Área do experimento

Autor, 2021

3.3.4 Efeito do biocarvão na biomassa microbiana

Para a contagem de microrganismos totais, após 30 e 60 dias do plantio das mudas de cana-de-açúcar, 10 g de cada amostra de solo rizosférico foram adicionadas em Erlenmeyers de 250 mL, contendo 90 mL da solução extratora contendo pirofosfato a 0,1%. As misturas foram submetidas à rotação de 300 rpm por 30 min. Após homogeneização, foram realizadas as diluições seriadas, onde, 1 mL foram diluídos em 9,0 mL da solução salina. O mesmo procedimento foi realizado, até a obtenção da concentração desejada. Dessa forma, as concentrações utilizadas no experimento foram de 10^{-1} e 10^{-2} para fungos e 10^{-3} a 10^{-7} para bactérias. Em triplicata, alíquotas de 0,1 mL de cada concentração foram incubadas por pourplate em meio ágar nutriente (com antifúngico) para bactérias e Martin (com antibiótico) para fungos em ambiente asséptico. As placas contendo o inóculo foram mantidas em BOD (Biochemical Oxygen Demand) em temperatura de 30 °C, durante 72 h. Após esse período, foi

realizada a contagem do número de colônias existentes, em contador de colônias com aumento de 6 vezes.

3.3.5 Efeito do biocarvão no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar

Após 30 dias do plantio, 25 plantas foram separadas do solo e os parâmetros altura, diâmetro da base, diâmetro da ponta, número de entrenós, número de folhas, número de perfilhos, massa total, massa do colmo, massa das folhas, massa da raiz, massa seca do colmo, massa seca da folha, massa seca da raiz e comprimento, foram avaliados. A porcentagem de massa seca (Ms%) foi determinada utilizando a equação 15. Esse processo foi repetido para o restante das plantas em 60 dias após o plantio.

$$Ms (\%) = \left(\frac{massa\ seca\ (g)}{massa\ fresca\ (g)} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 15})$$

3.4 Análise estatística

Os resultados da biomassa microbiana, bem como dos dados biométricos das mudas de cana-de-açúcar foram submetidos à análise de variância ANOVA e, aqueles que apresentaram diferença estatística significativa, foram submetidos ao teste de Tukey a 5 % de significância para comparação das médias no Software Estatístico Minitab 17 (Minitab, Pensilvânia, Estados Unidos).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar (BBT)

O BBT feito da biomassa do BCA, por meio da decomposição térmica do material, realizada em um forno de duplo tambor, apresentou um rendimento gravimétrico de 47,72 %, indicando que pouco menos da metade do material foi transformada em biocarvão (Tabela 2). Santana *et al.* (2021) encontraram valores entre 23,0 % e 40,8 % para produção de BBT em diferentes temperaturas. O teor de materiais voláteis calculado foi de 19,68 %, o de cinzas 13,09 % e a quantidade de carbono fixo resultou em 67,23 % (Tabela 2). Esse último valor está dentro da faixa esperada, isto é, entre 60 e 85 % (PANWAR; PAWAR; SALVI, 2019). Deve-se, ainda, destacar que o teor de carbono fixo elevado é desejável, pois esse parâmetro é a chave para a habilidade do biocarvão em promover o sequestro de carbono (DHAR; SAKIB; HILARY, 2020).

Tabela 2 – Características químicas do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor (BBT)

Biocarvão	Rendimento	Teor de voláteis	Teor de cinzas	Carbono Fixo	pH (em CaCl ₂)	CE* (mS/cm)
	% m/m					
BBT	47,72	19,68	13,09	67,23	7,34	94,10

* Condutividade elétrica.

Autora, 2022.

Faz parte da rotina dos estudos que envolvem a aplicação de biocarvão no solo, medir o pH e a condutividade elétrica (CE) do material. Compreender a quantidade de sais solúveis em uma solução com biocarvão é importante, já que altas taxas de sais no meio podem ser adversas para plantas sensíveis, nesse sentido, é utilizado a CE para mensurar esse valor (SINGH *et al.*, 2017). Ao medir a CE do BBT, o valor de 94,8 mS cm⁻¹ (Tabela 2) encontrado, foi maior que o mensurado por outros autores (AZADI; RAIESI, 2021; ALVES, 2021). Saber o pH do BBT também é importante, pois este pode influenciar no pH do solo e em outras propriedades e processos que ocorrem no meio. O BBT apresentou pH próximo de neutro, 7,34, na literatura é encontrado pH para biocarvões na faixa de 3,1 e 12,0, sendo que a maioria dos biocarvões são alcalinos devido ao processo de carbonização, em que grupos funcionais ácidos são

removidos e sais de elementos alcalinos prevalecem (SINGH *et al.*, 2017).

As curvas termogravimétricas (TG) também contribuem para investigação dos mecanismos físico-químicos relativos à decomposição térmica. Nesse sentido, foram investigadas as curvas TG do BCA e do BBT (Figura 7). Observa-se que a decomposição térmica do BCA pode ser dividida em três estágios. No primeiro estágio, ocorre a desidratação da biomassa com perda de massa de aproximadamente 7 %, no segundo estágio (até 400 °C), observou-se uma perda de massa de aproximadamente 68 %, indicando a decomposição da hemicelulose e da celulose e, no terceiro estágio (até 600 °C), observou-se uma perda de massa de aproximadamente 14 %, sugerindo a completa degradação da lignina. Já a curva TG do BBT revelou que esse material possui estabilidade térmica até aproximadamente 400 °C. Esse ganho de estabilidade é associado ao processo de decomposição térmica do BCA que promove um rearranjo de átomos de carbono, assim, é esperado um aumento da porosidade do material. Por isso, devido à alta área superficial específica, a capacidade de troca de cátions e adsorção de nutrientes são favorecidas.

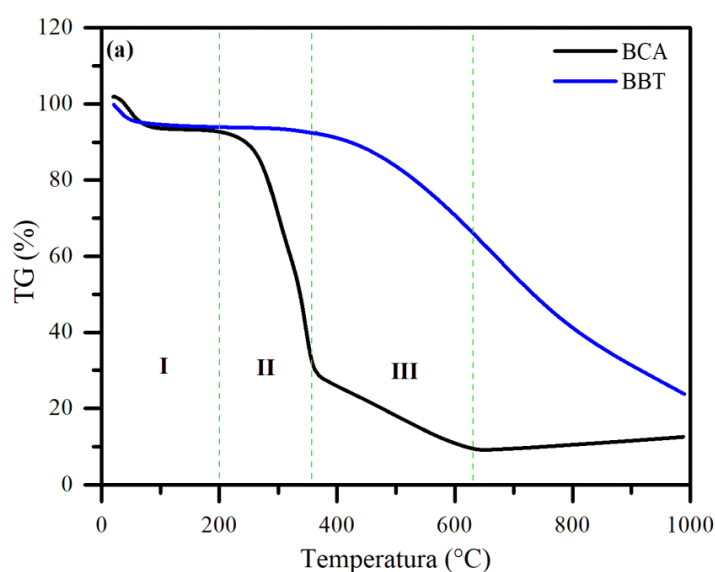


Figura 7 – Curvas termogravimétricas (TG) para o BBT (curva azul) e o BCA (curva preta)
Autor, 2021.

Uma forma de coletar evidências sobre a porosidade do BBT é utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Com as micrografias do BCA (Figura 8, pág. 43), é possível observar a presença de fibras cilíndricas alongadas e aparentemente uma estrutura esponjosa. As imagens deixam clara, ainda, a irregularidade da superfície desse material. Também é válido

menção que as características observadas estão de acordo com as descritas por Soares (2010) e Ribeiro (2017). Já nas micrografias do BBT (Figura 9, pág. 44), a superfície do biocarvão apresenta uma estrutura tipo favo de mel, isto é, uma estrutura porosa. Este fenômeno de abertura de poros está relacionado à carbonização da biomassa, como visto por Abreu (2013) e Ferreira e Finzer (2017). Com isso, destaca-se o desenvolvimento de uma estrutura porosa. E como citado anteriormente, esse resultado é importante para aplicação do BBT como condicionador, uma vez que o aumento da porosidade do solo tratado com esse produto, melhora a umidade e o tempo de residência dos nutrientes. Por isso, as atividades microbianas e a taxa de crescimento de plantas no solo tratado são favorecidas (SAKHIYA; ANAND; KAUSHAL, 2020).

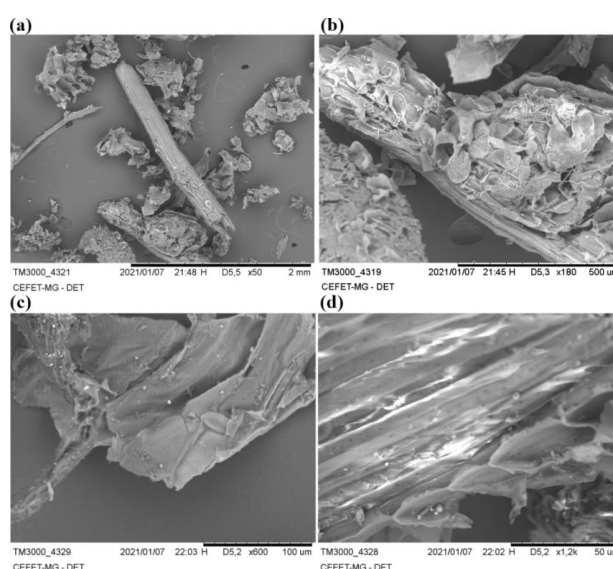


Figura 8 – Microscopia eletrônica de varredura do bagaço de cana-de-açúcar (BCA): a) 50x, b) 180x, c) 600x e d) 1200x

Autor, 2021.

Para obtenção de informações adicionais sobre a estrutura do BBT, foi analisado o perfil da isoterma de adsorção do azul de metileno (AM) na superfície desse material (KIPLING; WILSON, 1960). A Figura 10a (pág. 44) apresenta essa isoterma, observa-se um perfil côncavo, também chamada de favorável, já que a capacidade de adsorção (q_e) é alta mesmo em concentrações de equilíbrio (C_e) menores e aumenta para concentrações maiores, tendendo a um platô, que indica a saturação da monocamada do adsorvente (GRABOSKI *et al.*, 2021; NASCIMENTO, 2014).

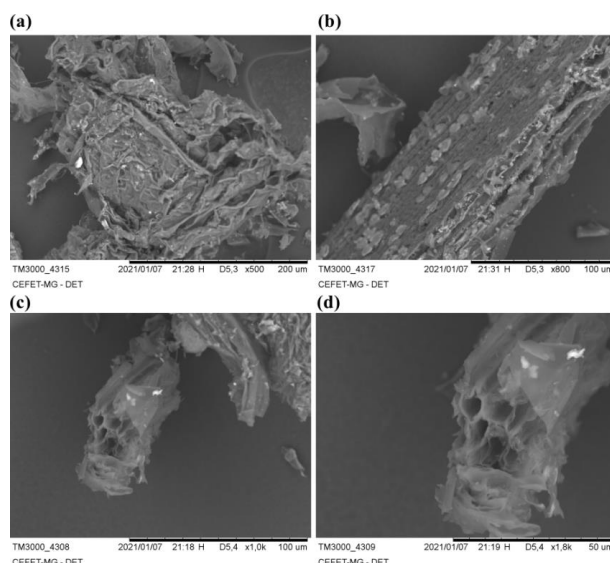


Figura 9 – Microscopia eletrônica de varredura do biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar (BBT): a) 500x, b) 800x, c) 1000x e d) 1800x
Autor, 2021.

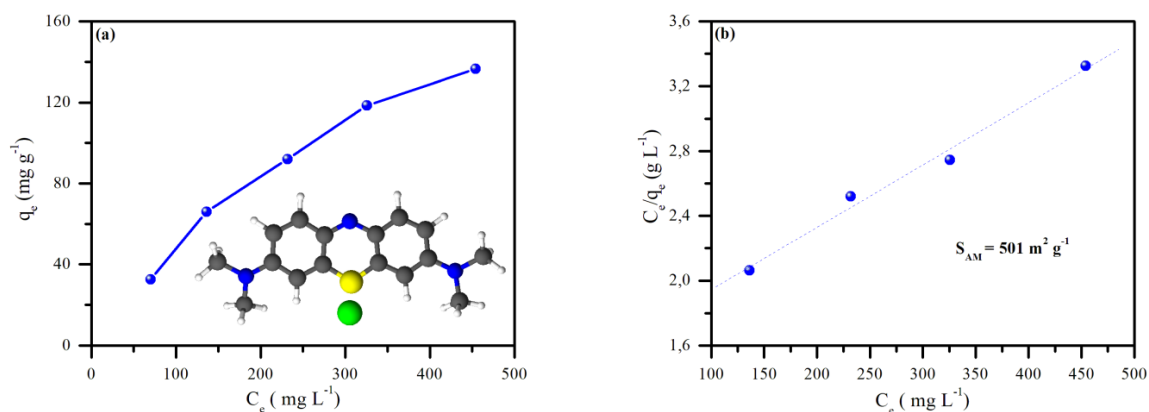


Figura 10 – (a) Isotherma de adsorção e (b) isoterma linearizada do modelo de Langmuir para adsorção do corante azul de metileno em BBT. A inserção mostra a fórmula do azul de metileno
Autor, 2021.

A isoterma de Langmuir, representada na Figura 10b (pág. 44), indica que o AM e o BBT têm afinidade. Deste modo, a capacidade máxima de adsorção de AM (q_m), calculada pelo modelo de Langmuir, foi de $259,7 \text{ mg g}^{-1}$, o que segundo Brum *et al.* (2008), quando comparada com carvão ativado comercial ($232,6 \text{ mg g}^{-1}$) é satisfatória. A área superficial aproximada do BBT, também pode ser estimada com base no valor de q_m , assim, o valor encontrado foi de 501

m^2g^{-1} . Esse valor aponta para presença de meso e macroporos na superfície do BBT (STAVROPOULOS; ZABANIOTOU, 2005). Mas vale destacar que esse resultado não exclui a presença de microporos. Ademais, visto que é objetivo deste trabalho melhorar a fertilidade de solos de canaviais aplicando o BBT como condicionador, bem como a sua microbiota, a área superficial estimada, é um bom valor para fornecer condições necessárias, devido a estrutura porosa formada (SAKHIYA; ANAND; KAUSHAL, 2020). É sabido que, com essas características do biocarvão, quando presente no solo, aumenta a porosidade deste, promove a formação de agregados, retenção de água e previne a perda de nutrientes por erosão e escoamento (JIEN, 2019), contribuindo para saúde do solo.

Pelo fato do biocarvão ser obtido a partir de diferentes biomassas, a sua composição química é altamente heterogênea. Por isso, também, foi investigada a composição dos constituintes inorgânicos do BBT por meio da análise da FRXED. Na Tabela 3, são apresentados os resultados na forma de óxidos, observa-se que os elementos majoritários são, em ordem de magnitude, Si, Al, Fe, K e Ca, totalizando mais de 90 %.

Tabela 3 – Composição química do biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar feita por Fluorescência de Raios X por dispersão de energia

Composto	Teor (%m/m)	Composto	Teor (%m/m)
SiO ₂	33,418	SO ₃	1,492
Al ₂ O ₃	16,494	MnO	0,228
Fe ₂ O ₃	15,332	ZnO	0,076
CaO	13,395	CuO	0,069
K ₂ O	12,227	SrO	0,022
TiO ₂	4,580	ZrO ₂	0,020
P ₂ O ₅	2,647		

Autor, 2021.

De maneira geral, os elementos químicos disponíveis no solo podem ser absorvidos pelas plantas, e, mesmo que não sejam fundamentais para nutrição, podem ser benéficos, ou seja, podem aumentar a resistência das plantas a pragas e doenças, ou favorecerem a absorção de outros elementos essenciais (MENDES, 2007).

Entre os macronutrientes exigidos para sobrevivências das plantas, estão o ferro (Fe), que é constituinte de inúmeros metabólitos, proteínas e enzimas mitocondriais, sendo essencial para síntese de clorofila; o potássio (K) que é ativador enzimático, regula o funcionamento dos estômatos e mantém o equilíbrio iônico com ânions; e o cálcio (Ca), que ajuda a evitar estresse por metais pesados e salinidade. Na composição do BBT, há, também, os elementos benéficos silício (Si), que é abundante na litosfera e confere resistência à infecção por fungos, ataque de insetos e rigidez às estruturas da cana-de-açúcar; e o alumínio (Al) que em baixas concentrações tem ação positiva na planta (MENDES, 2007).

Para complementar o estudo da composição do BBT foi utilizada a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e para fins de comparação o BCA também foi investigado. Os resultados são apresentados na Tabela 4 e Figuras 11 e 12 (pág. 46 e 47).

Tabela 4 – Resultados da Espectroscopia por Energia Dispersiva (% m/m) para BCA e BBT

Amostra	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca
BCA	50,24	49,00	*	0,34	0,24	0,10	0,09
BBT	88,08	11,19	0,12	0,19	0,19	0,09	0,08

*Não detectado.

Autor, 2021.

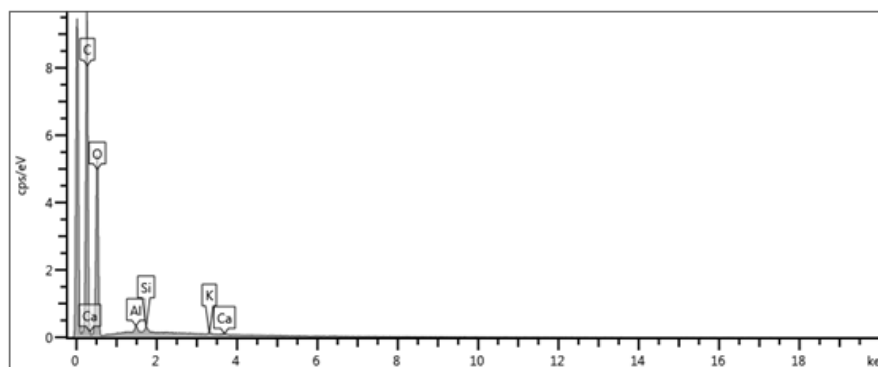


Figura 11 – Espectro por Energia Dispersiva (EDS) do BCA

Autor, 2021.

Ao comparar os dados registrados pela FRXED e EDS do BBT, nota-se a presença dos mesmos elementos inorgânicos, com a adição do magnésio (Mg), macronutriente importante para clorofila e ativação de enzimas relacionadas ao metabolismo energético das plantas (MENDES, 2007). O aumento no teor de carbono na amostra de BBT em relação ao BCA, está ligado à decomposição térmica do BCA em que agregou maior teor de carbono fixo ao material,

bem como a volatilização de oxigênio ligado a hidrogênio durante a desidratação e pirólise do material (RÓZ *et al.*, 2015).

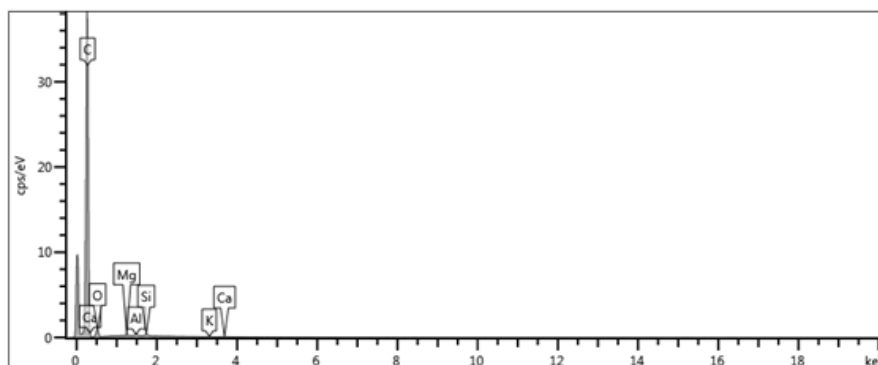


Figura 12 – Espectro por Energia Dispersiva (EDS) do BBT

Autor, 2021.

Para fins de comparação, a Tabela 5 apresenta os componentes contidos no biocarvão comercial. Nota-se que há em comum os macronutrientes magnésio, cálcio, potássio, ferro, fósforo, enxofre, manganês, zinco e cobre, elementos importantes para o desenvolvimento das plantas.

Tabela 5 – Tabela de componentes do biocarvão comercial, Biochar® Brasil.

Elemento	Teor (mg kg ⁻¹)	Elemento	Teor (mg kg ⁻¹)
N	4,1	Fe	1098,0
Ca	2,6	Mn	168,0
K	1,0	Na	56,7
Mg	0,7	B	13,6
S	0,5	Zn	12,0
P	0,3	Cu	2,8

Adaptado de Biochar® Brasil, 2022.

4.2 Efeito do biocarvão sobre as características físico-químicas do solo

As disposições das frações granulométricas areia, silte e argila do solo, nos diferentes tratamentos e intervalos de tempo de coleta, estão dispostas na Figura 13 (pág.48). A interseção das porcentagens de cada fração denominou a textura do solo no triângulo. O solo sem biocarvão apresentou uma textura argilosa e, com a introdução do biocarvão comercial e do BBT, houveram pequenas movimentações no triângulo textural sem influenciar a classificação da textura do solo.

Conhecer a textura de um solo é importante, já que, tem implicações diretas na taxa de infiltração e capacidade de retenção de água, nutrição de plantas, aeração e aderência ou força de coesão nas partículas, o solo franco-argiloso apresenta boa drenagem e boa capacidade de retenção de água e nutrientes, o solo argiloso possui baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água e nutrientes (ANTÔNIO, 2016), dessa forma, as movimentações ocorridas no triângulo textural, são relevantes para manter o ambiente úmido e nutritivo para as plantas e microrganismos.

Os resultados obtidos das análises de pH e umidade atual dos solos com as diferentes doses de biocarvão no dia da montagem do experimento, 30 e 60 dias após o plantio das mudas de cana-de-açúcar estão dispostos na Tabela 5 (pág. 49). A umidade atual varia com as doses de biocarvão no solo, sendo que com maiores doses de BBT há maior umidade, exceto para o biocarvão comercial, tal observação pode estar relacionada a porosidade do BBT que proporciona o acúmulo de água no solo.

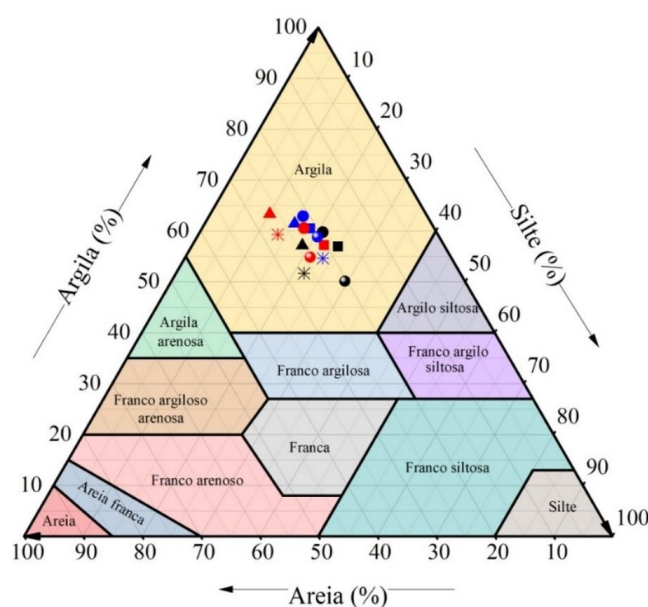


Figura 13 – Triângulo textural do solo para amostras de solo condicionadas com biocarvão produzido da cana-de-açúcar e biocarvão comercial. As cores preto, azul e vermelho representam o tempo de 0, 30 e 60 dias após a instalação do experimento, respectivamente. Os símbolos quadrado, círculo, triângulo, asterisco e esfera representam os tratamentos N, 1, 3, 5 e CC, respectivamente

Autor, 2021.

Woiciechowski *et al.* (2018), também verificaram que, com doses maiores de biocarvão no solo, há aumento na umidade, bem como no pH e nutrientes no solo devido ao teor de cinzas na constituição do material. Kim *et al.* (2021) aproveitaram estrategicamente os benefícios que o biocarvão traz para retenção de umidade no solo, em seu trabalho, indicaram que o biocarvão pode atuar como agente ligante para formação de macro agregados no solo, contribuindo para evitar a desintegração das partículas menores, sendo um mecanismo potencial para formação de mesoporos que aumentam significativamente a retenção de água e resiliência ao estresse hídrico no solo.

Os efeitos das diferentes doses de biocarvão no pH do solo ao longo do tempo de experimentação foram sutis. No tempo 0 dias após plantio, apenas o tratamento 5 apresentou variação dessa propriedade em relação ao solo sem biocarvão (N), com aumento de 0,1 unidade que se manteve estável (5,7) ao longo dos 60 dias. Com 30 dias após plantio, o pH aumentou em 0,1 unidade para o tratamento 1 e 0,2 unidade para o tratamento CC. Já aos 60 dias após plantio apenas o tratamento CC apresentou pH diferente das demais doses de biocarvão (5,4), e houve um aumento de 0,2 unidade no pH do tratamento N. Essa ligeira variação do pH do solo provavelmente ocorreu devido a capacidade tamponante do mesmo, típica de solos argilosos e/ou ricos em matéria orgânica (JEON; NAM, 2019), o que evitou grandes variações desse atributo.

Tabela 6 – Resultados do pH e umidade atual das amostras de solos

Parâmetro	Tratamento	Dias após plantio		
		0	30	60
pH	N	5,6	5,6	5,8
	1	5,6	5,7	5,7
	3	5,6	5,6	5,7
	5	5,7	5,7	5,7
	CC	5,6	5,8	5,4
Umidade atual (kg kg ⁻¹)	N	0,20 ± 0,01 c	0,46 ± 0,01 c	0,39 ± 0,00 c
	1	0,25 ± 0,00 a	0,50 ± 0,00 b	0,47 ± 0,01 b
	3	0,25 ± 0,00 a	0,71 ± 0,02 a	0,59 ± 0,04 a
	5	0,24 ± 0,00 b	0,70 ± 0,02 a	0,63 ± 0,01 a
	CC	0,17 ± 0,00 d	0,51 ± 0,01 b	0,38 ± 0,01 c

Médias e desvio padrão na coluna seguidos de letras diferentes são diferentes entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Autor, 2021. (N – solo sem BBT, 1 – solo com 1% de BBT, 3 – solo com 3% de BBT, 5 – solo com 5% de BBT e CC – solo com 5% de biocarvão comercial).

4.3 Desenvolvimento microbiano

Os dados do desenvolvimento de fungos e bactérias nos diferentes tratamentos e períodos de coleta são apresentados na Tabela 7. Após análise, é notável o efeito do biocarvão sobre os valores das unidades formadoras de colônias de fungos. Observou-se que aos 30 dias, na maior dose, o biocarvão influenciou negativamente a comunidade fúngica do solo. Mas ao findar dos 60 dias não foram registradas diferenças significativas ($p > 0,05$) em relação ao valor encontrado para o solo sem biocarvão (tratamento N). Esse resultado corrobora com o pH do solo, visto que a maioria dos fungos são adaptados a condições de pH mais ácido, desenvolvendo-se melhor em valores de pH menores que 5,0 (LEITE; ARAÚJO, 2007).

Tabela 7 – Unidades formadoras de colônia dos fungos e bactérias em diferentes doses de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio

Microrganismo	Tratamento	Dias após plantio		
		0	30	60
Fungos totais (UFC x 10 ⁻³ g ⁻¹ solo seco)	N	41,67 ± 5,03 a	32,33 ± 6,11 abc	21,67 ± 4,51 ab
	1	29,67 ± 4,93 ab	21,67 ± 6,43 bc	10,67 ± 2,31 ab
	3	9,33 ± 1,53 c	35,00 ± 14,53 ab	6,33 ± 4,04 b
	5	29,33 ± 4,73 ab	7,33 ± 3,06 c	27,67 ± 13,61 a
	CC	23,00 ± 6,24 b	58,00 ± 14,42 a	18,67 ± 1,16 ab
Bactérias (UFC x 10 ⁻⁶ g ⁻¹ solo seco)	N	317,33 ± 17,01 a	251,3 ± 80,6 bc	273,00 ± 26,1 b
	1	5,67 ± 0,58 c	650,7 ± 132,3 a	8,00 ± 3,61 c
	3	4,00 ± 4,36 c	168,33 ± 15,04 bc	1053,3 ± 64,7 a
	5	2,33 ± 1,16 c	8,67 ± 3,79 c	4,67 ± 3,06 c
	CC	128,3 ± 92,00 b	306,00 ± 174,00 b	45,0 ± 27,2 c

Médias e desvio padrão na coluna seguidos de letras diferentes são diferentes entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Autor, 2021.

Um comportamento semelhante foi observado para as unidades formadoras de colônias de bactérias. No entanto, vale destacar que aos 60 dias, o tratamento 3, isto é, com 3 % m/m de biocarvão apresentou uma evolução passando a ser destaque para o crescimento de bactérias, com incremento de aproximadamente 385 % de unidades formadoras de colônia, embora um efeito oposto tenha sido observado para os tratamentos 1 e 5. A razão para essa variação ainda não está clara, e requer novas investigações, mas é sabido que a introdução de biocarvão no solo afeta as comunidades microbianas devido às alterações que provoca nas propriedades do substrato. Isso implica na abundância e complexidade dos diversos grupos de microrganismos e na atividade que realizam no ambiente, sendo que o período de avaliação também influencia no comportamento desses seres vivos. Basicamente o efeito da adição de biocarvão é altamente variável no resultado para os microrganismos (BRTNICKY *et al.*, 2021).

4.4 Efeito do biocarvão no desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar

Os dados biométricos da cana-de-açúcar estão apresentados na Tabela 8 (pág. 53). Observaram-se diferenças significativas ($p < 0,05$) para o comprimento da raiz (cm) em 30 dias após plantio, sendo esse parâmetro para o tratamento 2 (37,80 cm) inferior aos registrados para os tratamentos 3 (59,80 cm) e 5 (47,00 cm). Porém esse valor foi estatisticamente igual ao valor do comprimento da raiz obtido com o tratamento N (47,20 cm). Liao *et al.* (2018) também observaram essa tendência ao avaliarem as biomassas radiculares da cana-de-açúcar cultivadas em solo condicionado com biocarvão derivado da palha da mandioca. Os autores destacaram que a inibição dos sistemas radiculares nos estágios inicial e de alongamento, provavelmente, ocorre por causa da adsorção de nutrientes do solo na superfície do biocarvão. Por outro lado, os autores encontraram que o condicionamento com o biocarvão promoveu o crescimento da raiz no período de maturidade da cana-de-açúcar.

Aos 60 dias após o início do experimento, o diâmetro da base (cm) também foi influenciado significativamente ($p < 0,05$) pelo condicionamento do solo com o biocarvão. Nas doses maiores (tratamentos 3 e 5), os diâmetros da base foram significativamente menores em relação ao controle (tratamento N). As reduções foram de aproximadamente 20 % para ambos os tratamentos. Um comportamento semelhante foi registrado para a massa e massa seca das raízes. Por exemplo, os tratamentos 3 e 5 causaram reduções, na massa seca, de cerca de 42 e 36 %, respectivamente. Os demais parâmetros biométricos avaliados não apresentaram diferenças significativas.

Diante do exposto, fica claro que os resultados deste estudo mostraram que o condicionamento do solo com BBT causou redução da média de alguns parâmetros biométricos do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar em relação àqueles obtidos com o cultivo em solo sem o biocarvão (Tabela 8, 53), apesar de outros estudos mostrarem melhorias no desenvolvimento da cana-de-açúcar cultivadas em solos condicionados com biocarvão (YANG *et al.*, 2015; LIAO *et al.*, 2019; GUTIÉRREZ *et al.*, 2021). Para exemplificar essas melhorias, pode-se citar uso do biocarvão obtido de casca de arroz que aumentou o rendimento do colmo em 5%, o número de folhas em 4%, a altura do ponto de crescimento em 11% e o Brix em 11% (CHITTAKONE, XUAN DUNG e PRESTON, 2017)

Duas hipóteses podem ser apontadas para explicar os resultados obtidos neste trabalho. A primeira envolve o tempo de avaliação de 60 dias, que pode ter sido insuficiente para observação do potencial do biocarvão, uma vez que várias pesquisas mostraram que o efeito do biocarvão no rendimento das culturas não é em curto prazo (SANTOS *et al.*, 2022; DALTO *et al.*, 2020; SILVA, 2017). De fato, Liao *et al.* (2018) mostraram que a adição do biocarvão aumentou a biomassa da cana-de-açúcar, mas não alcançou o nível de diferença significativa em um experimento de um ano. A segunda hipótese está associada a lixiviação de compostos fitotóxicos do biocarvão, uma vez que várias pesquisas mostraram que alguns compostos adsorvidos no biocarvão durante a sua produção podem ser lixiviados para o solo acarretando riscos de toxicidades para as plantas, microrganismos e invertebrados (GEZAHEGN *et al.*, 2021).

Para testar essa hipótese, a análise por RMN de ^1H do lixiviado do biocarvão foi conduzida (Figura 14). Essa análise revelou a presença de compostos carboxílicos de baixa massa molecular (ácido acético, ácido láctico e ácido fórmico) e de metanol comumente encontrados devido à decomposição da biomassa lignocelulósica. No entanto, embora a análise quantitativa não tenha sido realizada, as intensidades dos sinais registradas no espectro de RMN de ^1H (Figura 14), apontam para baixa concentração desses compostos.

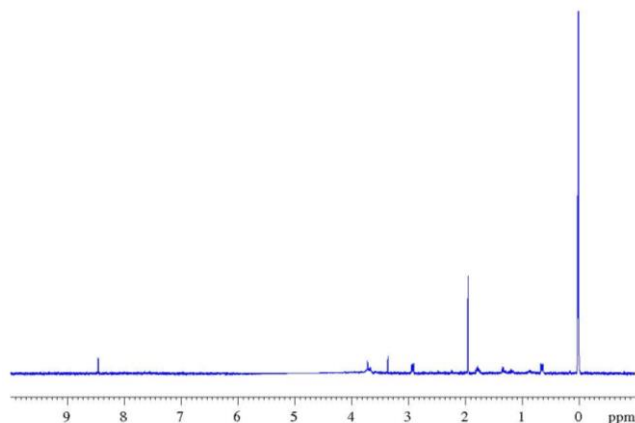


Figura 14 - Espectro de Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (400 MHz, tampão KH_2PO_4 em D_2O , pH 6,0, a 300 K do lixiviado do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar.

Autora, 2022.

Tabela 8 – Parâmetros de avaliação do desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar em diferentes doses de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio

(continua)

Parâmetros	Tratamento	Dias após plantio	
		30	60
Altura (cm)	N	27,06 ± 2,40	30,60 ± 7,15
	1	28,22 ± 0,93	32,20 ± 3,09
	3	27,16 ± 1,64	29,50 ± 3,52
	5	26,74 ± 0,89	28,30 ± 3,27
	CC	26,66 ± 0,92	41,4 ± 32,00
Diâmetro da base (cm)	N	0,87 ± 0,08	1,07 ± 0,11 a
	1	0,89 ± 0,03	0,90 ± 0,13 ab
	3	0,87 ± 0,08	0,86 ± 0,11 b
	5	0,96 ± 0,09	0,84 ± 0,07 b
	CC	0,90 ± 0,08	0,91 ± 0,05 ab
Diâmetro da ponta (cm)	N	0,85 ± 0,09	0,80 ± 0,07
	1	0,80 ± 0,07	0,81 ± 0,23
	3	0,80 ± 0,05	0,73 ± 0,04
	5	0,80 ± 0,09	0,83 ± 0,19

Tabela 8 – Parâmetros de avaliação do desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar em diferentes doses de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio

(continuação)

Parâmetros	Tratamento	Dias após plantio	
		30	60
Diâmetro da ponta (cm)	CC	0,78 ± 0,01	0,85 ± 0,33
Entrenós (unid.)	N	6,60 ± 0,55	8,00 ± 1,23
	1	6,40 ± 0,55	7,00 ± 0,00
	3	6,40 ± 1,14	7,80 ± 1,30
	5	6,00 ± 1,00	8,40 ± 0,89
	CC	5,80 ± 1,30	8,40 ± 2,51
Folhas (unid.)	N	7,20 ± 0,45	5,80 ± 0,45
	1	6,40 ± 0,55	5,60 ± 0,55
	3	6,60 ± 0,55	5,80 ± 0,84
	5	7,00 ± 0,00	7,40 ± 1,67
	CC	6,20 ± 0,45	6,40 ± 2,30
Comprimento da raiz (cm)	N	47,20 ± 14,91 ab	38,80 ± 3,27
	1	37,80 ± 4,66 b	41,00 ± 6,32
	3	59,80 ± 13,55 a	40,20 ± 6,22
	5	47,00 ± 11,77 ab	43,40 ± 6,66
	CC	37,80 ± 5,45 b	41,40 ± 10,76
Perfilho (unid.)	N	1,20 ± 1,10	1,60 ± 1,14
	1	0,80 ± 1,30	2,00 ± 1,58
	3	0,40 ± 0,55	1,00 ± 0,71
	5	0,40 ± 0,55	2,40 ± 1,67
	CC	1,80 ± 0,84	3,80 ± 3,27
Massa total (g)	N	35,80 ± 2,59	40,40 ± 10,16
	1	33,20 ± 0,84	37,00 ± 6,04
	3	34,20 ± 3,35	32,40 ± 5,46
	5	35,80 ± 5,26	45,40 ± 16,83
	CC	33,40 ± 3,05	47,00 ± 34,2

Tabela 8 – Parâmetros de avaliação do desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar em diferentes doses de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio

(continuação)

Parâmetros	Tratamento	Dias após plantio	
		30	60
Massa do colmo (g)	N	19,00 ± 1,87	29,40 ± 5,86
	1	18,20 ± 1,30	26,40 ± 5,59
	3	17,40 ± 1,82	23,00 ± 3,54
	5	19,80 ± 1,48	29,80 ± 10,33
	CC	18,20 ± 1,30	30,80 ± 21,35
Massa da folha (g)	N	16,80 ± 1,30	10,49 ± 2,69
	1	15,00 ± 1,00	8,56 ± 1,12
	3	16,80 ± 3,03	6,43 ± 3,13
	5	16,00 ± 5,39	12,16 ± 7,67
	CC	15,20 ± 3,11	15,78 ± 14,60
Massa da raiz (g)	N	16,00 ± 6,44	6,85 ± 1,75 ab
	1	9,80 ± 5,26	5,36 ± 1,22 b
	3	11,80 ± 5,17	4,16 ± 1,48 b
	5	11,20 ± 3,96	4,75 ± 0,54 b
	CC	13,60 ± 8,56	8,47 ± 2,54 a
Massa seca da folha (g)	N	6,00 ± 1,23	3,15 ± 2,25
	1	5,00 ± 0,00	2,96 ± 2,06
	3	5,60 ± 0,89	2,48 ± 1,35
	5	3,00 ± 1,23	4,39 ± 3,99
	CC	2,80 ± 0,84	4,38 ± 3,50
Massa seca do colmo (g)	N	7,40 ± 1,14 a	7,20 ± 1,05
	1	6,60 ± 0,55 a	7,50 ± 0,40
	3	6,20 ± 0,84 ab	6,30 ± 0,42
	5	5,80 ± 1,30 ab	7,04 ± 2,40
	CC	4,40 ± 1,14 b	6,83 ± 4,08
Massa seca da raiz (g)	N	8,40 ± 2,88	6,43 ± 1,57 ab
	1	4,80 ± 2,39	5,30 ± 0,48 ab

Tabela 8 – Parâmetros de avaliação do desenvolvimento das mudas de cana-de-açúcar em diferentes doses de biocarvão no solo em 30 e 60 dias após plantio

(continuação)

Parâmetros	Tratamento	Dias após plantio	
		30	60
Massa seca da raiz (g)	3	4,00 ± 2,45	3,73 ± 1,56 b
	5	5,80 ± 1,92	4,09 ± 1,01 b
	CC	6,80 ± 3,56	8,09 ± 2,64 a

Médias e desvio padrão na coluna seguidos de letras diferentes são diferentes entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Autor, 2021.

CONCLUSÃO

Com as análises realizadas, pode-se concluir que a transformação do BCA em biocarvão, por meio do forno de duplo tambor, proporcionou a formação de uma superfície porosa, essa característica é importante para criação de sítios para abrigo de microrganismos, retenção de água e nutrientes.

Verificou-se que a introdução do biocarvão em diferentes doses no solo apresentou diferenças significativas no desenvolvimento das raízes e diâmetro da base das mudas de cana-de-açúcar. E, para o crescimento microbiano, entende-se que não houve diferença significativa do desenvolvimento dos fungos, mas nas bactérias a dose de 3 % m/m de BBT foi favorável. Acredita-se que esses resultados possam ter relação com o curto tempo de experimento.

O BBT se mostrou um material que retém umidade no solo, promove alterações no desenvolvimento da microbiota do solo e influencia no aprofundamento das raízes. Dessa forma, conclui-se que o biocarvão produzido apresenta características que o torna um bioproduto promissor para uso na agricultura.

A partir desses resultados, é interessante se pensar em trabalhos futuros com outras espécies agrônômicas e diferentes tipos de condições do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M. B. **Preparação de carvão ativado de bagaço de cana-de-açúcar e sua aplicação na adsorção de Cd(II) e Cu(II)**. 2013. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Processos Químicos, Utfpr, Apucarana, 2013.
- AHMAD, A. *et al.* Effect of sewage sludge biochar on the soil nutrient, microbial abundance, and plant biomass: A sustainable approach towards mitigation of solid waste. *Chemosphere*, v. 287, 2022.
- AQUINO, G. S. *et al.* Desenvolvimento de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de torta de filtro e modos de aplicação. **Semina. Ciências agrárias: revista cultural e científica da Universidade Estadual de Londrina**, v. 39, n. 5, p.1899-1908, 2018.
- ALCARDE, A. R. **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar: outros produtos**. AGEITEC (Agência Embrapa de Informação Tecnológica), 2009. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html. Acesso em: 13 setembro 2021.
- ALVES, B. S. Q. *et al.* Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, v. 31, n. 4, p. 572-582, 2021.
- AMARAL, M. M. S; LAGES, M. S. Análise da resistência à compressão uniaxial de compósitos cimentícios com bagaço e cinzas da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 22, n. 3, 2019.
- ANDRADE, R. P. *et al.* Desenvolvimento de MPB de cana-de-açúcar em função do uso de nitrogênio e torta de filtro no solo. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. especial, p. 06-12, 2018.
- ANTÔNIO, A. C. Propriedades de solo II - Textura, cor e porosidade. Aula 3. E-Tec Brasil – Solos. 2016.
- ARAÚJO, G. J. F. de; OLIVEIRA, S. V. W. B de. Análise de viabilidade econômica financeira do uso de vinhaça para geração de eletricidade no Brasil. **Cadernos EBAPE.BR FGV**, v. 8, n. 4, 2020.
- AWAD, Y. M. *et al.* Biochar, a potential hydroponic growth substrate, enhances the nutritional status and growth of leafy vegetables. **Journal Of Cleaner Production**, v. 156, p. 581-588, 2017.
- AZADI, N.; RAIESI, F. Sugarcane bagasse biochar modulates metal and salinity stresses on microbial functions and enzyme activities in saline co-contaminated soils. **Applied Soil Ecology**, v. 167, 2021.
- BERNARDINO, C. A. R. *et al.* Torta de Filtro, Resíduo da Indústria Sucroalcooleira - Uma Avaliação por Pirólise Lenta. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, 2018.

BIOCHAR® BRASIL. **Adubo Orgânico Saco Biochar Pó 3kg – Certificado**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1825480784-adubo-orgnico-saco-biochar-po-3kg-certificado-_JM#position=5&search_layout=stack&type=item&tracking_id=e35bb6f0-0581-440d-b8d8-0c9cbf3665b2. Acesso em: 19 nov. 2022.

BOON, E. *et al.* Interactions in the microbiome: communities of organisms and communities of genes. **FEMS Microbiology Reviews**, Amsterdam, v. 38, p. 90–118, 2014.

BOUQBIS, L. *et al.* Phytotoxic effects of argan shell biochar on salad and barley germination. **Agric. Nat. Resour.** 2017, 51, 247–252

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 716 p.

BRITO, D. R. *et al.* Salinização e degradação de solo: uma consequência da adoção e uso inadequado de tecnologia. **Diversitas Journal**, v. 5, n. 3, p. 1707-1719, 2020.

BRTNICKY, M. *et al.* A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. **Science of the Total Environment**, v. 796, 2021.

BRUM, S. S. *et al.* Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1048-1052, 2008.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2ª edição. Piracicaba, São Paulo: ESALQ, 2016.

CARNEIRO, J. S. S. *et al.* Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of the Total Environment**, v. 760, 2021.

CATELAN, T. C.; PINOTTI, L. M. Avanços das pesquisas envolvendo *Aspergillus niger* e bagaço de cana-de-açúcar como fonte de carbono visando à produção de celulases: Uma análise bibliométrica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.

CHANG, Y. *et al.* Biochar improves soil physical characteristics and strengthens root architecture in Muscadine grape (*Vitis rotundifolia* L.). **Chemical And Biological Technologies In Agriculture**, v. 8, n. 1, 2021.

CHEN, Y. *et al.* Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 526, 2010.

CHRISTOFOLETTI, C. A. *et al.* O emprego de diferentes resíduos utilizados como fertilizantes na cultura de cana-de-açúcar. In: FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. (org). **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru, SP: Canal 6, 2017. P. 63-86.

CHITTAKONE, I; XUAN DUNG, N. N.; PRESTON, T. R. Sugar cane had higher yield when established from node cuttings rather than from long stems and had a higher sugar content when the soil was amended with biochar. **Livestock Research for Rural Development**, v. 29, n. 219, 2017.

CINTRA, L.F.D. *et al.* **Distribuição das raízes de cana-de-açúcar em sistemas de cultivo com adubação orgânica e *Crotralaria spectabilis***. EMBRAPA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 12, ISSN 1517-198, Aracaju, SE, 2006.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, v. 6 – Safra 2019-20, n. 4- **Quarto levantamento**, p. 1-62, abril 2020.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, v. 8 – Safra 2021-22, n. 2- **Segundo levantamento**, p. 1-62, agosto 2021.

CORREIA, M. A. C. *et al.* Características e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar armazenado sem cobertura por um período prolongado. **Revista em Agronegócio**, Maringá, v. 13, n. 1, p. 173-187, 2020.

DENNIS, J. **Biochar Manual for Small Farms in BC**. v. 1, 2011.

DHAR, S.A., SAKIB, T.U. HILARY, L.N. Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020

DIAS, B. A. S. **Mapeamento da cana-de-açúcar em Minas Gerais**. 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

DIONÍSIO, S. R. *et al.* Second-generation ethanol process for intrgral usr of hemicellulosic and cellulosic hydrolysates from diluted sulfuric acid pretreatment of sugarcane bagasse. **Fuel**, v. 304, 2021.

FARIA, G. **Biocarvão feito com resíduos é testado como condicionador de solo**. Embrapa, 03 de out. de 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/28595289/biocarvao-feito-com-residuose-testado-como-condicionador-de-solo#:~:text=%C3%89%20o%20caso%20do%20biocarv%C3%A3o,da%20mat%C3%A9ria%20org%C3%A2nica%20no%20solo>. Acesso em: 25 set.2020.

FERREIRA, J. C.; FINZER, J. R. D. Carvão ativado de bagaço da cana-de-açúcar: adsorção de íons de chumbo. **Xxxviii Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, Maringá – Paraná, 2017.

FILHO, S. T. M. *et al.* Utilização de resíduos da construção civil e cinza do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de argamassa de revestimento. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, v. 12, n. 2, 2019.

FILHO, S. T. M.; MARTINS, C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 10, n. 4, p. 1205-1224, 2017.

GEZAHEGN S, SAIN M, THOMAS SC (2021). Phytotoxic condensed organic compounds are common in fast but not slow pyrolysis biochars. **Bio Tech Rep** 13: 100613.

GINEBRA, M. *et al.* Biochar impacts on soil chemical properties, greenhouse gas emissions and forage productivity: A field experiment. **Science of the Total Environment**, v. 8061, 2022.

GOROVTSOV, A. V. *et al.* The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. **Environmental Geochemistry And Health**, v. 42, n. 8, p. 2495-2518, 2019.

GRABOSKI, J. *et al.* Adsorção de diclofenaco de sódio por carvão ativado obtido a partir de resíduos de couro curtido ao cromo (iii). Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química, 2021.

GUARNIERI, S. F. *et al.* Coconut fiber biochar alters physical and chemical properties in sandy soils. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 43, 2021.

GUTIÉRREZ, G. O. *et al.* Biocarbón de bambú como mejorador de la fertilidad del suelo en caña de azúcar. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 12, n. 65, p. 67-88, 22 abr. 2021.

HILOIDHARI, M. *et al.* Energy-carbon-water footprint of sugarcane bioenergy: a district-level life cycle assessment in the state of Maharashtra, India. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 151, 2021.

IBGE. Censo Agro 2017. Ranking – Cana-de-açúcar dos Municípios de Minas Gerais por Área colhida. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html?localidade=31&tema=76593>. Acesso em: 08 de out. de 2020.

IRFAN, M. *et al.* Response of soil microbial biomass and enzymatic activity to biochar amendment in the organic carbon deficient arid soil: a 2-year field study. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 3, 2019.

JIA, Y. *et al.* Application of biochar-coated urea-controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency. **Chemical And Biological Technologies in Agriculture**, v. 8, n. 1, 2021.

JHEN, S.-H. Physical Characteristics of Biochars and Their Effects on Soil Physical Properties. Chapter 2: Biochar from Biomass and Waste, p. 21–35, 2019.

JOSEPH, S. D. *et al.* An investigation into the reactions of biochar in soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, p. 501–51, 2010.

JEON, I., NAM, K. Change in the site density and surface acidity of clay minerals by acid or alkali spills and its effect on pH buffering capacity. **Scientific Reports**, v. 9, 2019.

KHAN, M. M. *et al.* Composite of polypyrrole with sugarcane bagasse cellulosic biomass and adsorption efficiency for 2,4-dichlorophenoxy acetic acid in column mode. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 2016-2025, 2021.

KIM, Y. J. *et al.* The role of biochar in alleviating soil drought stress in urban roadside greenery. **Geoderma**, v. 404, n. 115223, 2021.

KIPLING, J. J.; WILSON, R. B. Adsorption of methylene blue in the determination of surface areas. **Journal of Applied Chemistry**, 10:109-113, 1960.

LANGE, A. *et al.* Degradação do solo e pecuária extensiva no norte de Mato Grosso. **Nativa, Sinop**, v. 7, n. 6, p. 642-648, 2019.

LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. Ecologia Microbiana do Solo. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2007.

LIAO, F., YANG, L., LI, Q. *et al.* Effect of Biochar on Growth, Photosynthetic Characteristics and Nutrient Distribution in Sugarcane. **Sugar Tech**21, 289–295 (2019).

LOPES, J. G.; SANTOS, K. C dos; COSTA, A. A. Prospecção tecnológica do uso do bagaço de cana-de-açúcar visando a produção de etanol de segunda geração. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 10, n. 3, p. 590-599, 2017.

MADARI, B.E. *et al.* Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar Primavera): um estudo prospectivo. Comunicado Técnico 125, Santo Antônio de Goiás, GO, ISSN 1678-961X, dezembro, 2006.

MARADIAGA-RODRIGUEZ, W. D. *et al.* Effects of vinasse and lithothanmium application on the initial growth of sugar cane (*Saccharum* sp. cv. RB 86-7515) irrigated and not irrigated. **Acta Agronómica**, v. 67, n. 2, p 252-257, 2018.

MARAFON, A. C. *et al.* Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**, p. 179-194, 2020.

MARQUES PIRES, W. *et al.* Cultivo da cana-de-açúcar sob diferentes níveis de reposição hídrica, com e sem adição de nitrogênio. **Científic@ - Multidisciplinary Journal**, vol. 5, n. 3, p. 56-87, 2018.

MATOS, E. C. T. *et al.* Espectroscopia fotoacústica para analisar a fertilidade de solos tratados com biochar e micorriza. **Química Nova**, v. 41, n. 9, p. 989-998, 2018.

MAUAD, F. F.; FERREIRA, L. C.; TRINDADE, T. C. G., 2017. Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras. EESC/USP, São Carlos, 349p.

MEDINA, E. C. *et al.* Reuso da vinhaça na produção de mudas pré brotadas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4154-4161, 2020.

MENDES, A. M. S. **Introdução a fertilidade do solo**. (2007). [Material preparado a partir de textos didáticos da disciplina SOL 671 oferecida pelo Departamento de Solos da UFV no Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas]. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/35800/1/OPB1291.pdf>. Acesso em: 31 out. 2021.

MME. Resenha Energética Brasileira – Edição 2020. Ministério de Minas e Energia. 2020. Disponível em: <<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/resenha-energetica-brasileira>>. Acesso em: 13 de fev. de 2021.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 626 p.

MORELL, P. O. *et al.* Influência da Matéria Prima na Produção de Biogás por Diferentes Tipos de Vinhaça. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n. 4, p. 349-358, 2018.

MOTA, M. F. C. *et al.* Biochar as alternative substrate for the production of sugarcane seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 12, 2021.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **ADSORÇÃO**: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. p. 1-258.

NEHRING, V. *et al.* INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE VINHAÇA NAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS NO ESTADO FRESCO. **Colloquium Exactarum**, v. 12, n. 2, p. 38-44, 2020.

NÓBREGA, Í. P. C. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo**. 2011. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NOVA CANA. Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas. **novaCana.com**, 26 de jan. de 2013. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 24 out. 2021.

NOVA CANA. Processos de fabricação do etanol. **novaCana.com**, 12 de dez. de 2012. Disponível em: <https://www.novacana.com/etanol/fabricacao>. Acesso em: 24 out. 2021.

OLIVEIRA, J. T. *et al.* Increase in the irrigated area of sugarcane and its potential in the bioenergetic generation of Brazil. **Colloquium Agrariae**, v. 17, n. 3, 2021.

O'TOOLE, A.; ZARRUK, K. Knoth de; STEFFENS, M.; RASSE, D. P. Characterization, Stability, and Plant Effects of Kiln-Produced Wheat Straw Biochar. **Journal Of Environmental Quality**, v. 42, n. 2, p. 429-436, 2013. Wiley.

PANDEY, S. D. *et al.* Properties of carbon particles in archeological and natural Amazon rainforest soils. **Catena**, v. 194, 2020.

PANDEY, S. D. *et al.* Structural and elemental analysis of biochars in the search of a synthetic path to mimetize anthropic Amazon soils. **Journal of Environmental Management**, v. 279, 2021.

PANWAR, N. L.; PAWAR, A.; SALVI, B. L. Comprehensive review on production and utilization of biochar. **Sn Applied Sciences**, v. 1, 2019

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa**. 2012. 322f. Tese (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

PAZ, J. E. M.; GARNICA, A. I. C.; CURBELO, F.D.S. Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana de açúcar ativado. **Holos**, v. 8, 2018.

PÉREZ, I. *et al.* Evaluation of Filter Cake Oil as Antifoam in Yeast Production: New Use for this By-Product of the Sugarcane Derivatives Industry. **Waste and Biomass Valorization**, 2021.

PIERRI, L. *et al.* Accessing biochar's porosity using a new low field NMR approach and its impacts on the retention of highly mobile herbicides. **Chemosphere**, v. 287, 2022.

RABELO, S. C.; COSTA, A. C. da; ROSSEL, C. E. V. Industrial Waste Recovery. **Sugarcane**, p. 365-381, 2015.

REDI. Condicionadores de solos: entenda a importância da matéria orgânica para a recuperação da terra. 2016. Disponível em: <http://www.redifertilizantes.com.br/condicionadores-de-solos-entenda-a-importancia-da-materia-organica-para-a-recuperacao-da-terra/>. Acesso em: 01 nov. 2021.

RESENDE, T. M.; ROSOLEN, V. Degradação do solo pela conversão do cerrado em pastagem natural na bacia do Ribeirão Bom Jardim (Triângulo Mineiro / MG). **Ateliê Geográfico**, v. 5, n. 1, p. 118-134, 2011.

REZENDE, E. I. P *et al.* Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 5, p. 426-433, 2011.

REZENDE, M. F. *et al.* Substituição parcial do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar em habitações de interesse social. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso alegre, v. 9, n. 1, 2017.

RIBEIRO, N. S. **Estudo termogravimétrico da combustão e oxicomustão de misturas carvão mineral-biomassa**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Unesp, Guaratinguetá, 2017.

ROMERO, C. M. *et al.* Nutrient retention, availability and greenhouse gas emissions from biochar-fertilized Chernozems. **Catena**, v. 198, 2021.

ROSA, J. Quanto custa plantar cana. Pecege. 2018. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/plantio/produtores-desembolsaram-r-7-3-mil-hectare-renovar-canavial-2017-18-190418>>. Acesso em: 13 de fev. de 2021.

ROSATO, M. M.; BOLONHEZI, A. C.; FERREIRA, L. H. Z. Substâncias húmicas sobre qualidade tecnológica de variedades de cana-de-açúcar. *Scientia agraria*, v. 11, n. 1, p. 43, 2010.

RÓZ, A. L. *et al.* Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, 2015.

SAKHIYA, A. K.; ANAND, A.; KAUSHAL, P. Production, activation, and applications of biochar in recent times. **Biochar**, v. 2, n. 3, p. 253-285, 2020.

SALETNIK, B. *et al.* Biochar as a Stimulator for Germination Capacity in Seeds of Virginia Mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby). **Appl. Sci**, 9, 3213, 2019.

SANTANA, M.J.B. *et al.* Influência da temperatura e da lavagem nas características de biocarvões de bagaço de cana-de-açúcar e de laranja. **4º Congresso Sul – Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS), Gramado – RS, 2021.

SILVA, S. C.; FERREIRA, R. A. Aspectos jurídicos e ambientais da monocultura de cana-de-açúcar. **Revista Dat@venia**, v. 9, n. 1, 2017.

SILVA, M. da *et al.* Effect of the Incorporation of Sugarcane Bagasse Biochar in Leaching and Bioavailability of Clomazone in Soil. **Journal Of The Brazilian Chemical Society**, v. 11, n. 30, p. 2386-2394, 2019.

SILVA NETO, J. V. da; GALLO, W. L. R.; NOUR, E. A. A. Production and use of biogas from vinasse: implications for the energy balance and ghg emissions of sugar cane ethanol in the brazilian context. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 39, n. 1, 2019.

SINGH, B. *et al.* Chapter 3. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. *In: _____. Biochar: A Guide to Analytical Methods*. CSIRO, p. 23-38, 2017.

SOARES, M. M. N. S. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Ufmg, Belo Horizonte, 2010.

SOARES, J. A. B. *et al.* Uso do resíduo da indústria sucroalcooleira para a produção de mudas de quiabo. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 6, 2020.

SOUTO, T. J. M. P. *et al.* Viabilidade da bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 409-429, 2018.

SOUZA, J. G. *et al.* Resíduos orgânicos e biocarvões para fins de condicionante de solos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, 2021.

STAVROPOULOS, G. G. ZABANIOTOU, A. A. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 82, p. 79–85, 2005.

TANG, B. *et al.* Effect of biochar on immobilization remediation of Cd-contaminated soil and environmental quality. **Environmental Research**, v. 204, 2022.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TRAZZI, P. A. **Uso do Biocarvão na Produção de Mudas e no Crescimento Inicial de Pinustaeda L.** 119f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

TRAZZI, P. A. *et al.* Biocarvão: Realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

TOSELHO, M. E. C. *et al.* Influência de materiais recicláveis e vinhaça da cana-de-açúcar na resistência mecânica de tijolos ecológicos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, 2021.

ULLAH, Z. *et al.* Biochar impact on microbial population and elemental composition of red soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 16, 2020.

VIDAL, M. F. AÇÚCAR: CENÁRIO MUNDIAL E SITUAÇÃO DE PRODUÇÃO NO BRASIL E NO NORDESTE BRASILEIRO. **Caderno Setorial ETENE**, Banco do Nordeste, ano 6, n. 162, maio, 2021.

VIEIRA, G.E.G. *et al.* Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 105-212, 2014.

VITTI, G. C. *et al.* Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. Palestra apresentada a equipe técnica da Stoller, Bebedouro, SP, 2005.

VIVAÇÚCAR. Desvendando a produção: 5 etapas do processo de produção de açúcar. **vivacucar.com.br**, 24 de ago. de 2017. Disponível em: <https://vivacucar.com.br/5-etapas-do-processo-de-producao-do-acucar/>. Acesso em: 24 out. 2021.

WANG, Z. -J. *et al.* Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas. **Huanjing Kexue/Environmental Science**, v. 42, n. 8, p. 3931-3942, 2021.

WARNOCK, D. D. *et al.* Mycorrhizal responses to biochar in soil: concepts and mechanisms. **Plant and Soil**, v. 300, p. 9-20, 2007.

WOICIECHOWSKI, T. *et al.* Nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, 2018.

XAVIER, C. S. F. *et al.* Use of sugarcane bagasse in the adsorption of textile dyes in aqueous solutions. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, 2021.

YADAV, T. K. *et al.* Calcium pretreated pinus roxburghii wood biochar for adsorptive removal of fluoride from aqueous solution. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 12, n. 4, p. 4307-4316, 2022.

YOO, J-H. *et al.* Effects of brewer's spent grain biochar on the growth and quality of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*). **Applied Biological Chemistry**, v. 64, n. 1, 2021.

ZELAYA, K. P. S. *et al.* Biochar in sugar beet production and nutrition. **Ciência Rural**, v. 49, n. 5, 2019.

ZHANG, X. *et al.* Urea removal in reclaimed water used for ultrapure water production by spent coffee biochar/granular activated carbon activating peroxydisulfate and peroxydisulfate. **Bioresource Technology**, v. 343, 2022.