

TRANSFORMAÇÃO DE RESÍDUOS DO CAFÉ EM BIOCHAR: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL

TRANSFORMATION OF COFFEE WASTE INTO BIOCHAR: A SUSTAINABLE SOLUTION

TRANSFORMAR RESIDUOS DE CAFÉ EN BIOCARBÓN: UNA SOLUCIÓN SOSTENIBLE



10.56238/sevened2026.001-031

Tatiana de Freitas Silva

Doutora em Engenharia Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas

E-mail: tatiana.silva@ifsuldeminas.edu.br

Alexandre Thomé da Silva de Almeida

Doutor em Ciências Veterinárias

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas

E-mail: alexandre.almeida@ifsuldeminas.edu.br

João Otávio Costa Almeida

Graduando em Engenharia Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas

E-mail: joao4.almeida@alunos.ifsuldeminas.edu.br

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo produzir biochar a partir da casca de café por meio de pirólise lenta e avaliar suas propriedades químicas e estruturais, bem como seus efeitos sobre as características físico-químicas do solo cultivado com *Allium schoenoprasum*. O biochar foi obtido em forno mufla a 300 °C, apresentando conversão média de 78,61%. Foram testadas diferentes granulometrias (150 e 300 mesh) e concentrações (1%, 2% e 3% m/m). As análises laboratoriais evidenciaram que a aplicação do biochar promoveu aumento do pH e da soma de bases, elevação da capacidade de troca catiônica (CTC) e maior retenção de nutrientes como potássio, cálcio, magnésio e fósforo, em comparação ao solo sem biochar. A análise física revelou incremento das frações de argila e areia fina, resultando em maior capacidade de retenção de água. Visualmente, observou-se crescimento mais vigoroso das plantas de cebolinha e menor incidência de pragas nos vasos tratados com biochar. Do ponto de vista ambiental, o biochar apresenta uma estrutura porosa e estável, com potencial de atuar como sumidouro de carbono, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, o uso do biochar de casca de café demonstra ser uma alternativa sustentável para o manejo de resíduos agrícolas e melhoria da fertilidade do solo, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 12, 13 e 15) e às metas globais de economia circular e baixo carbono.

Palavras-chave: Pirólise. Fertilidade do Solo. Resíduos Agrícolas. Carbono. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The present study aimed to produce biochar from coffee husks through slow pyrolysis and to evaluate its chemical and structural properties, as well as its effects on the physicochemical characteristics of soil cultivated with *Allium schoenoprasum*. The biochar was obtained in a muffle furnace at 300 °C, with an average conversion rate of 78.61%. Different particle sizes (150 and 300 mesh) and concentrations (1%, 2%, and 3% w/w) were tested. Laboratory analyses showed that the application of biochar increased soil pH and base saturation, enhanced cation exchange capacity (CEC), and improved the retention of nutrients such as potassium, calcium, magnesium, and phosphorus compared to soil without biochar. Physical analysis revealed an increase in clay and fine sand fractions, resulting in greater water retention capacity. Visually, a more vigorous growth of chives plants and a lower incidence of pests were observed in pots treated with biochar. From an environmental standpoint, the biochar exhibited a porous and stable structure, with potential to act as a carbon sink, contributing to the mitigation of greenhouse gas emissions. Therefore, the use of coffee husk biochar proves to be a sustainable alternative for agricultural waste management and soil fertility improvement, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs 12, 13, and 15) and the global targets of circular economy and low-carbon development.

Keywords: Pyrolysis. Soil Fertility. Agricultural Residues. Carbon. Sustainability.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo producir biocarbón a partir de cascarilla de café mediante pirólisis lenta y evaluar sus propiedades químicas y estructurales, así como sus efectos sobre las características físicoquímicas del suelo cultivado con *Allium schoenoprasum*. El biocarbón se obtuvo en un horno de mufla a 300 °C, mostrando una conversión promedio del 78,61 %. Se probaron diferentes tamaños de partícula (malla 150 y 300) y concentraciones (1 %, 2 % y 3 % p/p). Los análisis de laboratorio mostraron que la aplicación de biocarbón promovió un aumento del pH y la suma de bases, un aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y una mayor retención de nutrientes como potasio, calcio, magnesio y fósforo, en comparación con el suelo sin biocarbón. El análisis físico reveló un aumento en las fracciones de arcilla y arena fina, lo que resultó en una mayor capacidad de retención de agua. Visualmente, se observó un crecimiento más vigoroso de las plantas de cebollino y una menor incidencia de plagas en las macetas tratadas con biocarbón. Desde una perspectiva ambiental, el biocarbón presenta una estructura porosa y estable, con el potencial de actuar como sumidero de carbono, contribuyendo a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, el uso de biocarbón de cáscara de café demuestra ser una alternativa sostenible para la gestión de residuos agrícolas y la mejora de la fertilidad del suelo, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12, 13 y 15) y los objetivos globales de economía circular y bajas emisiones de carbono.

Palabras clave: Pirólisis. Fertilidad del Suelo. Residuos Agrícolas. Carbono. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de resíduos orgânicos representa um dos desafios ambientais mais urgentes da atualidade, visto que, no Brasil em 2015 em torno de 7,3 milhões de toneladas de resíduos tiveram um destino inadequado (Zago; Barros, 2019).

Essa situação gera uma sobrecarga da capacidade de tratamento e contribui para a emissão de gases de efeito estufa. Entre esses resíduos, destaca-se a casca de café, subproduto gerado em larga escala nas regiões produtoras.

O cenário se torna destacado, uma vez que é uma atividade notória no Brasil. Pois, atualmente se coloca como o país que mais produz café em todo o mundo, sendo responsável por 29,62% da produção global (FERREIRA; CAVATON, 2025).

E olhando para mais próximo, no estado de Minas Gerais, que ocupa posição de liderança nacional na cafeicultura, a produção anual atinge 1.735.408 toneladas (IBGE, 2023). E no Sul de Minas, municípios como Pouso Alegre registram cultivo significativo, com 30 hectares de área plantada e produção média de 750 sacas por ano.

Apesar de seu potencial para valorização, a destinação mais comum da casca de café ainda é o descarte, contribuindo para o desperdício de biomassa rica em nutrientes e agravando o problema ambiental associado à má gestão de resíduos.

Uma alternativa promissora para reverter esse cenário é a conversão da casca de café em biochar, um material rico em carbono obtido por pirólise de biomassa. Suas propriedades, evidenciadas por (YAMEEN et al., 2024), de: elevada porosidade, estabilidade química, alta capacidade de retenção de nutrientes e potencial de sequestro de carbono tornam-no atrativo para aplicações agrícolas e ambientais.

Conforme apontado por (WANG et al., 2024) o biochar tem a capacidade de melhorar a estrutura física do solo, aumentar a capacidade de troca de cátions (CTC), reduzir a lixiviação de nutrientes, reter umidade e adsorver poluentes orgânicos, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas ao reter carbono.

Nesse contexto, este estudo busca avaliar a produção de biochar a partir da casca de café por pirólise lenta e investigar seu potencial de retenção de cátions no solo, fator essencial para a fertilidade e a produtividade agrícola. A pesquisa foi conduzida com diferentes granulometrias e porcentagens de aplicação do biochar, permitindo observar a influência desses parâmetros no desempenho agrônomo e ambiental.

Ao propor o aproveitamento de um resíduo amplamente disponível, este trabalho se alinha às estratégias de economia circular, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados à cafeicultura e a agricultura de forma geral.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Instituto Federal do Sul de Minas Gerais – Campus Pouso Alegre, utilizando solo coletado na própria instituição.

2.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A matéria-prima utilizada foi a casca de café obtida em parceria com produtores locais. Para a produção do biochar, empregou-se um forno mufla, operando em regime de pirólise lenta. Para as etapas de preparação, foram utilizados ainda liquidificador doméstico, pistilo e almofariz, além de peneiras metálicas de 300 mesh e 150 mesh. Os ensaios laboratoriais de caracterização do solo e do biochar foram realizados com o apoio do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa.

2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento do projeto ocorreu em etapas sucessivas:

1. Coleta dos resíduos: a casca de café foi coletada junto a produtores locais da região e separada por catação manual.
2. Trituração inicial: o material foi triturado em liquidificador por aproximadamente 5 minutos.
3. Pesagem inicial: a biomassa foi pesada em balança analítica antes da pirólise.
4. Produção do biochar: a pirólise lenta foi realizada em mufla a 300 °C por 15 minutos. Essa faixa de temperatura (300–600 °C) foi escolhida por proporcionar bom rendimento mássico e características adequadas de retenção de água e nutrientes segundo variadas fontes bibliográficas.
5. Pesagem final: após a carbonização, as amostras foram novamente pesadas para cálculo da taxa de conversão (relação massa inicial/massa final).
6. Trituração secundária: o biochar obtido foi triturado em pistilo e almofariz para homogeneização.
7. Peneiramento: o material foi separado em granulometrias de 150 mesh e 300 mesh, a fim de avaliar diferenças de porosidade e capacidade de adsorção.
8. Aplicação nos vasos: o biochar foi incorporado ao solo em vasos de 3 litros, cultivados com *Allium schoenoprasum* (cebolinha). As proporções aplicadas foram 1%, 2% e 3% m/m, calculadas com base na massa de solo.
9. Tratamentos experimentais: foram estabelecidos sete tratamentos, sendo:
 - Controle (solo sem biochar);
 - Três concentrações (1%, 2% e 3%) com granulometria de 150 mesh;

- Três concentrações (1%, 2% e 3%) com granulometria de 300 mesh.

2.3 ANÁLISES LABORATORIAIS

Foram realizadas análises físico-químicas para caracterização do solo e avaliação dos efeitos do biochar:

- Análise granulométrica (determinação das frações areia grossa, areia fina, silte e argila, usando Classificação ZARC determinando Tipo de solo, Classe AD e Quantidade AD).
- Análises químicas:

- pH H₂O;

Teores de macronutrientes: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺).

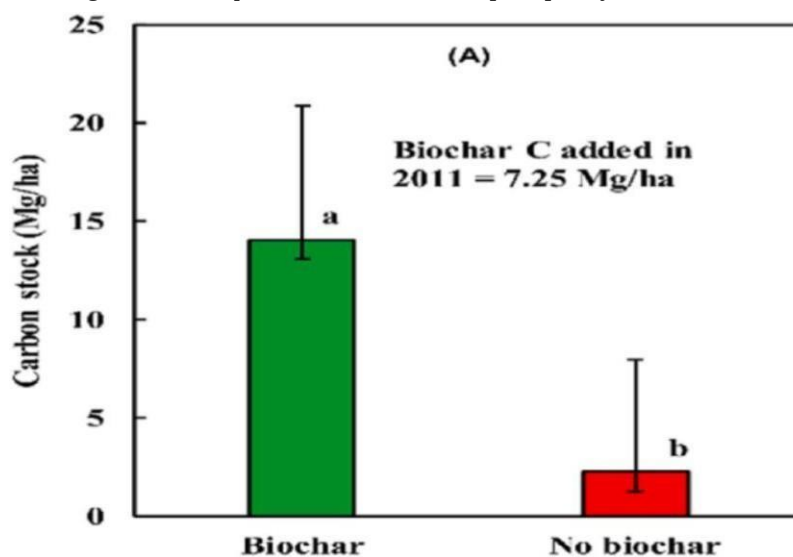
- Teores de alumínio trocável (Al³⁺) e acidez potencial (H + Al).
- Soma de bases trocáveis (SB).
- Capacidade de troca catiônica efetiva (t).
- Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T).
- Índice de saturação por bases (V).
- Índice de saturação por alumínio (m).
- Fósforo remanescente (P-rem).

Essas análises permitiram estabelecer a linha de base do solo e verificar modificações após a incorporação do biochar.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O biochar exerce um papel central no ciclo do carbono, funcionando como uma forma eficiente de sequestro desse elemento na matriz do solo. De acordo com K.N. Shoudho et al., a incorporação do biochar pode aumentar em mais de quatro vezes o estoque de carbono no solo, quando comparado a áreas sem sua aplicação. Esse resultado evidencia o potencial do material em contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que o carbono é retirado da atmosfera, por meio da biomassa, e estabilizado no solo sob a forma de carbono recalcitrante.

Figura 1 – Estoque de carbono no solo após aplicação de biochar.



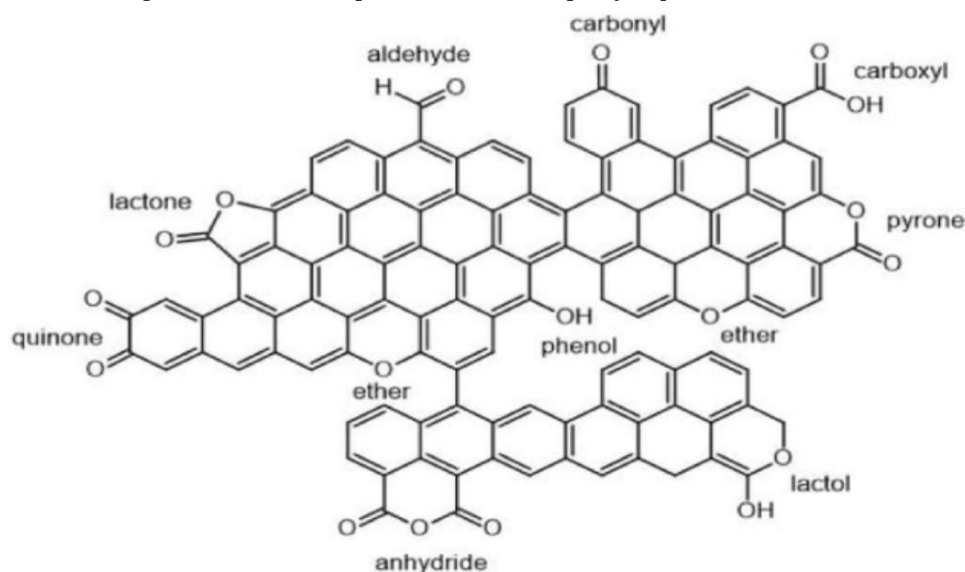
Fonte: K.N. Shoudho et al.

A Figura 1 ilustra esse efeito, destacando a expressiva elevação no armazenamento de carbono após a aplicação do biochar.

Segundo K.N. Shoudho et al. esse processo se deve à estrutura aromática do biochar, altamente resistente à degradação biológica, o que permite que o carbono fique retido no solo por longos períodos, variando de anos a décadas. Eles reforçam que o biochar se constitui em uma forma de carbono estável, com efeito direto na redução das emissões de gases de efeito estufa. Além de atuar como sumidouro de carbono, sua adição ao solo favorece a fertilidade, a retenção de água e os processos biogeoquímicos que estimulam o acúmulo de carbono natural.

Portanto, a participação do biochar no ciclo do carbono transcende o papel de simples condicionador de solo, configurando-se como uma estratégia de mitigação climática de alta relevância, alinhada a políticas globais de redução das emissões de CO₂ e a práticas agrícolas mais sustentáveis.

Figura 2 – Estrutura representativa da composição química do biochar.



Fonte: K.N. Shoudho et al.

A estrutura química do biochar, apresentada na Figura 2, é composta majoritariamente por anéis aromáticos condensados, que formam uma rede estável de hexágonos de carbono interligados. Essa configuração confere ao material elevada estabilidade química e resistência à degradação microbiana, o que explica sua longa permanência no solo por décadas após a aplicação (K.N. Shoudho et al.).

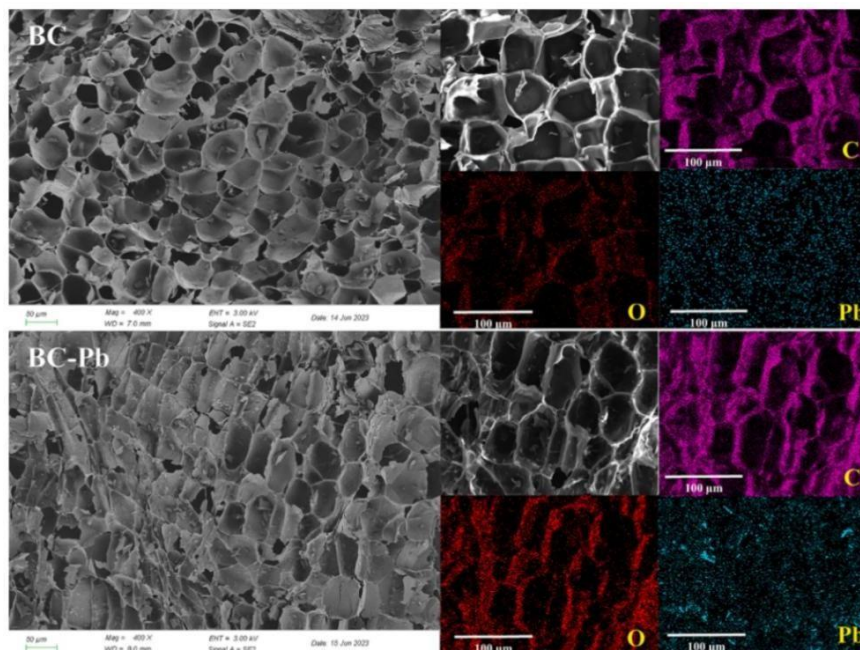
Além do núcleo aromático recalcitrante, o biochar apresenta uma variedade de grupos funcionais oxigenados em sua superfície, como carboxilas (-COOH), carbonilas (C=O), hidroxilas fenólicas (-OH ligados ao anel aromático), éteres (C-O-C), lactonas, quinonas e anidridos. Esses grupos funcionais representam os polos ativos de adsorção, permitindo a interação com cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) e moléculas orgânicas. Por esse motivo, o biochar promove o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e intensifica a retenção de nutrientes no solo (K.N. Shoudho et al.).

A heterogeneidade química é outro aspecto central. Embora a estrutura do biochar seja dominada por carbono aromático estável, as regiões funcionalizadas com oxigênio permanecem ativas, atuando no controle do pH e conferindo reatividade superficial. Essa dualidade estrutural – entre a durabilidade conferida pelos anéis aromáticos e a atividade agrônômica dos grupos funcionais – explica a eficácia do biochar tanto como condicionador de solo quanto como agente de mitigação climática (K.N. Shoudho et al.).

Agronomicamente, a combinação entre estrutura porosa e grupos funcionais superficiais favorece uma maior retenção de água, a adsorção de fósforo e de metais, além de otimizar o aproveitamento de nutrientes pelas plantas. Paralelamente, o núcleo aromático estabiliza o carbono, promovendo o sequestro de CO_2 atmosférico e, conseqüentemente, contribuindo de

maneira significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Figura 3 – Imagens de SEM-EDS do biochar antes e após a adsorção de Pb(II).



Fonte: Yuan et al. (2025).

Na Figura 3 é possível observar, por meio das imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM-EDS), as diferenças estruturais do biochar antes e após o processo de adsorção de Pb(II). Nota-se a presença de partículas aderidas e a distribuição de chumbo sobre a superfície do biochar depois do contato com a solução contaminada, confirmando o sucesso da adsorção. Esses resultados reforçam o papel dos grupos funcionais oxigenados e da estrutura porosa do biochar na fixação de íons metálicos pesados, destacando sua eficácia como material adsorvente (Yuan et al., 2025).

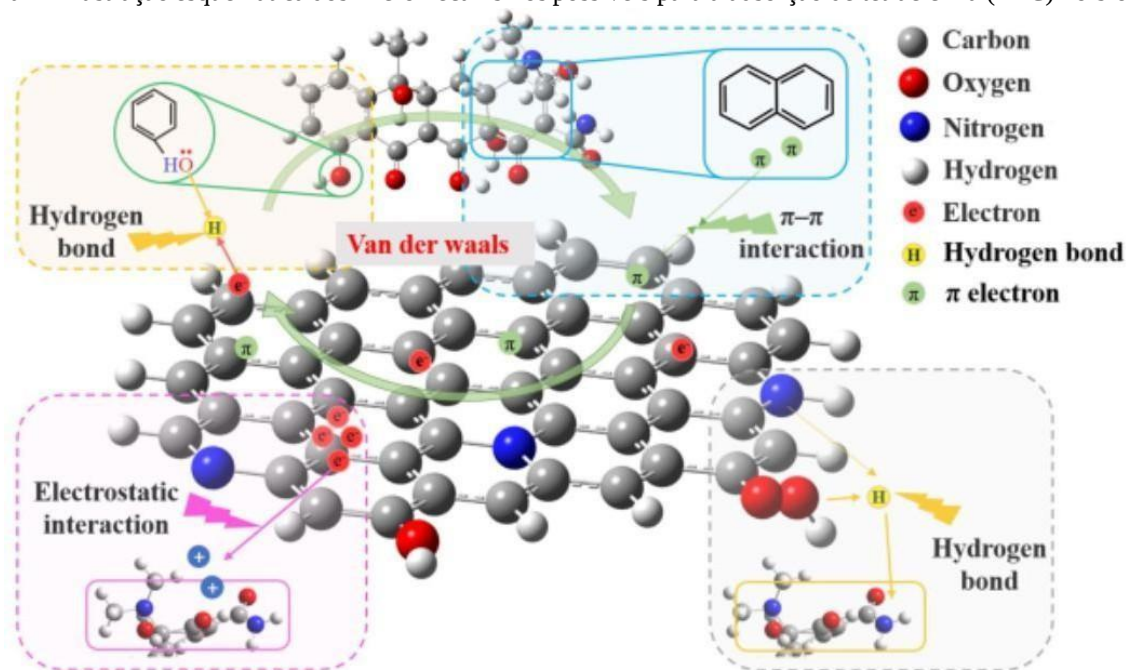
O estudo de Yuan et al. (2025) demonstra que o biochar derivado de resíduos da medicina tradicional chinesa atua como um adsorvente eficiente e de baixo custo para a remoção de chumbo em águas contaminadas. Segundo os autores, o mecanismo de remoção de Pb^{2+} envolve principalmente: precipitação superficial, complexação com grupos funcionais oxigenados (como carboxilas e fenóis), e troca iônica entre cátions presentes no biochar (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) e o chumbo da solução.

Esses mecanismos reforçam a importância da estrutura heterogênea do biochar, capaz de combinar estabilidade aromática com superfícies reativas ricas em grupos funcionais.

Além disso, os autores destacam que a utilização de resíduos de fitoterápicos como matéria-prima para a produção de biochar representa uma alternativa sustentável, evitando que esses resíduos se tornem passivos ambientais e, ao mesmo tempo, criando um material de alto valor agregado para aplicações ambientais. Assim, o biochar mostra-se promissor não apenas para

tratamento de solos agrícolas, mas também como estratégia para o tratamento de águas residuais contaminadas por metais pesados, reforçando seu papel multifuncional no contexto da sustentabilidade ambiental.

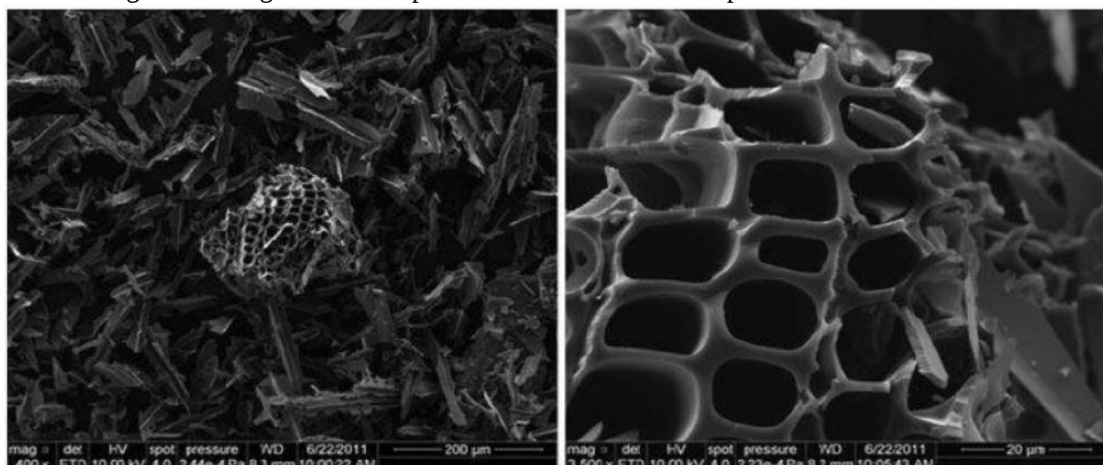
Figura 4 – Ilustração esquemática dos micromecanismos possíveis para a adsorção de tetraciclina (TTC) no biochar.



Fonte: Zhang et al. (2024).

Na Figura 4, é possível observar os principais mecanismos de interação da tetraciclina com o biochar, evidenciando a multifuncionalidade da superfície do material (Zhang et al.,). A imagem mostra que a adsorção não ocorre por um único processo, mas pela ação combinada de interações eletrostáticas entre grupos funcionais carregados do biochar e as moléculas de tetraciclina, ligações de hidrogênio envolvendo grupos $-OH$ e $-COOH$ do biochar e grupos polares do antibiótico, interações π - π entre os anéis aromáticos da tetraciclina e a estrutura aromática do biochar, troca iônica entre cátions da superfície e íons do antibiótico, além de complexação com grupos funcionais oxigenados. Essa diversidade de mecanismos, evidenciada na figura, depende de fatores como pH, temperatura, porosidade e composição química do biochar, bem como da estrutura da tetraciclina, reforçando a importância de otimizar as propriedades do biochar para maximizar sua capacidade de remoção de antibióticos de soluções aquosas (Zhang et al.).

Figura 5 – Imagens microscópica evidenciando a estrutura porosa do biochar.



Fonte: K.N. Shoudho et al.

Na Figura 5 observa-se, por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM), a estrutura altamente porosa do biochar. A presença de microporos e mesoporos, aliada a uma superfície rugosa, confere ao material elevada área superficial e grande potencial de adsorção. Essas propriedades estruturais estão diretamente associadas à capacidade do biochar de reter contaminantes, água e nutrientes, além de contribuir para sua estabilidade no solo e no ciclo global do carbono (K.N. Shoudho et al.).

As características estruturais observadas na Figura 5, como a elevada porosidade e a ampla superfície rugosa do biochar, não apenas explicam sua capacidade de adsorção de contaminantes e retenção de água e nutrientes, mas também refletem o efeito do processo de carbonização da biomassa. Essas propriedades são diretamente influenciadas pelas condições de pirólise, que determinam a formação de microporos, mesoporos e a estabilidade química do material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

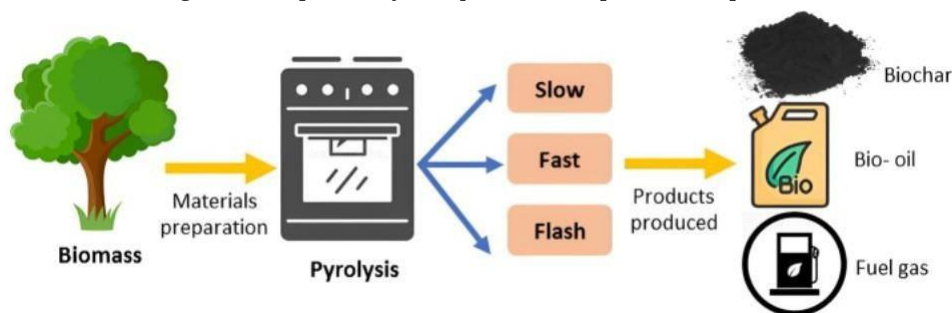
A presente pesquisa encontra-se diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, em especial os ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre), os quais visam promover práticas agrícolas mais sustentáveis, mitigar os impactos ambientais e estimular o uso racional dos recursos naturais (PNUD Brasil, s.d.). O aproveitamento da casca de café para produção de biochar contribui para esses objetivos ao reduzir o volume de resíduos orgânicos descartados inadequadamente, diminuir a emissão de gases de efeito estufa e, simultaneamente, melhorar a fertilidade dos solos.

Além disso, este trabalho dialoga com a agenda da COP 30, conferência internacional que será sediada no Brasil, cuja pauta central está diretamente ligada à transição para uma economia de baixo carbono e ao fortalecimento de ações voltadas para o enfrentamento da crise climática.

Nesse sentido, o uso de biochar como tecnologia sustentável se apresenta como uma estratégia coerente com as recomendações e diretrizes discutidas na conferência, visto que favorece tanto o sequestro de carbono quanto a valorização de resíduos agrícolas (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025).

Outro fator interessante a ser comentado é que o projeto se relaciona com compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, como os previstos no Protocolo de Quioto, o qual estabeleceu mecanismos globais para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a promoção de alternativas tecnológicas de baixo impacto ambiental. Ao propor a conversão de resíduos agrícolas em biochar e sua aplicação em solos cultiváveis, esta pesquisa contribui com os esforços nacionais de mitigação de carbono e reforça a necessidade de ampliar práticas agrícolas de base sustentável (Ministério do Meio Ambiente, 2025).

Figura 6 – Representação esquemática do processo de pirólise



Fonte: Yameen et al.

A figura 6 representa o processo básico da formação de biochar através da pirólise de uma biomassa.

Com base nisso, a carbonização da biomassa de casca de café foi realizada por meio do processo de pirólise lenta, que resulta na formação de biochar, gases e bio-óleo. Entretanto, devido aos equipamentos utilizados (forno de mufla) e à própria metodologia de pirólise lenta, não houve condensação do gás para formação de bio-óleo, cumprindo assim o objetivo do projeto de produzir carvão de biochar. Durante a pirólise, a ausência de oxigênio impede a combustão da biomassa, garantindo a retenção de carbono no material, o que evita sua liberação para a atmosfera e já promove benefícios ecológicos desde a etapa de produção.

A conversão de biomassa em biochar depende de fatores como a matéria-prima utilizada e as condições do processo de pirólise. As tabelas a seguir apresentam a relação entre a quantidade de casca de biomassa utilizada e a quantidade de biochar gerado para as diferentes produções:

Tabela 1 - Produção 1 de biochar

Produção 1	Massa de entrada (g)	Massa de saída (g)	Conversão % m/m
Cadinho 1.1	90,3 g	77,1 g	85,38%
Cadinho 1.2	108,1 g	81,6 g	75,48%
Cadinho 1.3	116,7 g	92,2 g	79%
Cadinho 1.4	112,5 g	88,6 g	78,75%
Cadinho 1.5	94,8 g	76,9 g	81,12%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 2 - Produção 2 de biochar

Produção 2	Massa de entrada (g)	Massa de saída (g)	Conversão % m/m
Cadinho 2.1	108,4 g	80,5 g	74,26%
Cadinho 2.2	106 g	82 g	77,35%
Cadinho 2.3	112,3 g	89,8 g	75,51%
Cadinho 2.4	108,7 g	87,3 g	80,31%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3 - Produção 3 de biochar

Produção 3	Massa de entrada (g)	Massa de saída (g)	Conversão % m/m
Cadinho 3.1	102,7 g	79,3 g	77,21%
Cadinho 3.2	100,3 g	84 g	83,74%
Cadinho 3.3	107,1 g	85,7 g	80,01%
Cadinho 3.4	102,1 g	86,6 g	84,81%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4 - Produção 4 de biochar

Produção 4	Massa de entrada (g)	Massa de saída (g)	Conversão % m/m
Cadinho 4.1	107,4 g	83,2 g	77,46%
Cadinho 4.2	109 g	85,3 g	78,25%
Cadinho 4.3	103,5 g	79,8 g	77,10%
Cadinho 4.4	110,9 g	83,1 g	74,93%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 5 - Produção 5 de biochar

Produção 5	Massa de entrada (g)	Massa de saída (g)	Conversão % m/m
Cadinho 5.1	109,4 g	81,7 g	74,68%
Cadinho 5.2	106,2 g	86,6 g	81,54%
Cadinho 5.3	108,4 g	83,7 g	77,21%
Cadinho 5.4	105,6 g	82,7 g	78,31%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6 - Produção total e conversão média

Produções	Conversão % m/m
Produção 1	79,94%
Produção 2	76,85%
Produção 3	81,44%
Produção 4	76,93%
Produção 5	77,93%
CONVERSÃO MEDIA TOTAL:	78,61%

Fonte: Elaborada pelo autor

A conversão média das produções de biochar foi de 78,61% que pode ser representado pelo fluxograma abaixo com a quantidade total de massa de entrada e saída:

Figura 7 – Balanço de entrada e saída produção de biochar.



Fonte: Elaborada pelo autor

Outro fator importante testado no projeto foi a diferença de granulometria do biochar, que influencia diretamente sua funcionalidade no solo. Foi testado as medidas de 300 mesh e 150 mesh aplicando para cada uma dessas medidas nas porcentagens de 1%, 2% e 3% de m/m comparado também a um sem o uso de biochar.

O *Allium schoenoprasum* foi escolhido como planta modelo neste estudo devido à sua

excelente adaptação ao solo e ao clima local. Além disso, seu crescimento acelerado permite a obtenção de resultados mais rapidamente, facilitando a análise dos efeitos do biochar sobre a produtividade vegetal. Outra vantagem é sua capacidade de produzir múltiplas colheitas ao longo do tempo, possibilitando a observação contínua dos impactos da aplicação do biochar no solo.

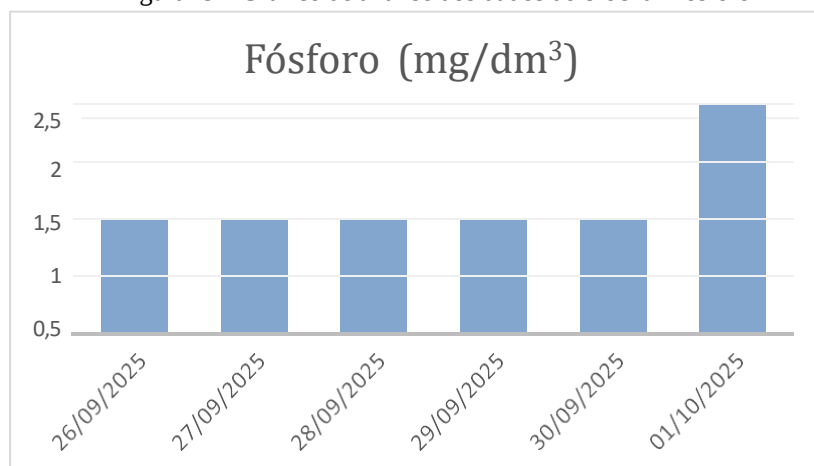
Com esses experimentos foram enviados para análises pelo Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

Tabela 7 - Análise de pH, P e K			
Tratamentos	pH	Fósforo (mg/dm ³)	Potássio (mg/dm ³)
0% PRÉ PLANTIO	6,58	41,1	194
0% PÓS CULTIVO	6,66	19,2	76
1 % - 150 MESH	7,08	18	361
1 % - 300 MESH	7,03	32,3	276
2 % - 150 MESH	7,41	18,2	617
2 % - 300 MESH	7,08	16,1	288

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

O pH do solo apresentou aumento após a incorporação do biochar, indicando uma tendência de alcalinização do sistema em comparação ao solo sem adição. A elevação do pH pode melhorar as condições para a disponibilidade de nutrientes em solos ácidos, reduz a solubilidade de alumínio tóxico e favorece o desenvolvimento radicular como confirmado por (RONQUIM, 2010).

Figura 8 – Gráfico de análise dos dados do biochar Fósforo

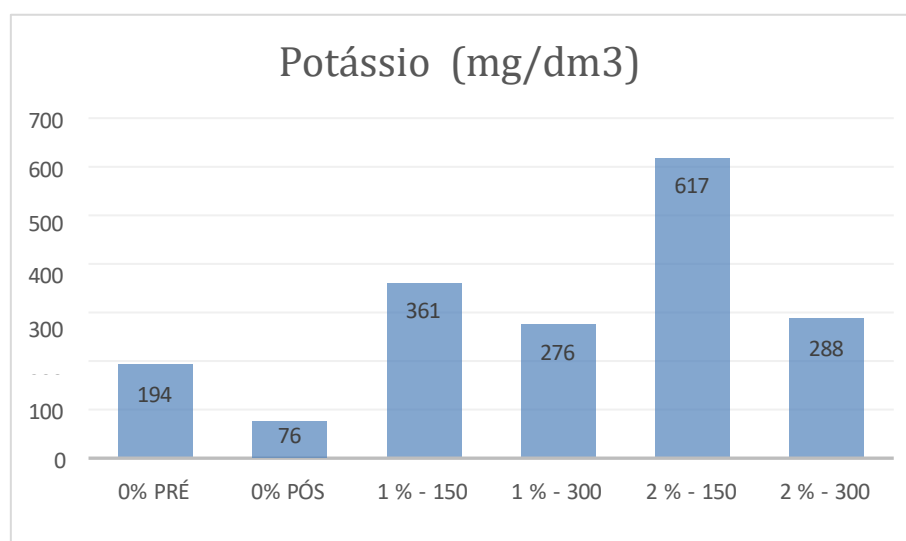


Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

Os dados mostram que o teor de fósforo disponível diminuiu após o ciclo de cultivo no controle sem biochar, evidenciando a retirada por parte das plantas e possível lixiviação natural durante o cultivo. Entre os tratamentos com biochar, houve diferenças entre granulometrias e doses, indicando que a presença do biochar influencia a dinâmica de fósforo no cultivo da *Allium schoenoprasum*.

A dinâmica do potássio observada evidencia dois pontos: o cultivo promove lixiviação/consumo de potássio, especialmente em plantios de café onde a lixiviação de potássio é fator importante, como afirmado por (Gomes et al., 2025). E o biochar de casca de café pode reverter ou até aumentar sensivelmente a disponibilidade de potássio no solo.

Figura 9 – Gráfico de análise dos dados do biochar Potássio



Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

Esse resultado é relevante porque o potássio é reconhecido como o segundo nutriente mais exigido pelo cafeeiro (Matiello et al., 2010), e sofre perdas significativas por colheita e lixiviação.

Os resultados de retenção e aumento de potássio demonstram o potencial do próprio resíduo da cultura (casca de café) transformado em biochar para suprir parte da demanda potássica da lavoura, configurando um exemplo prático de economia circular: o subproduto retorna à cadeia produtiva como fonte de nutriente.

Do ponto de vista agrônomo, esse efeito do biochar sobre potássio pode reduzir parcialmente a necessidade de adubações externas potássicas, com ganhos econômicos e ambientais.

Tabela 8 - Análise de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H + Al, SB

Tratamentos	Ca^{2+} cmolc/dm ³	Mg^{2+} cmolc/dm ³	Al^{3+} cmolc/dm ³	H + Al cmolc/dm ³	SB cmolc/dm ³
0%PRÉ PLANTIO	8,98	1,3		1,8	10,82
0%PÓS CULTIVO	5,94	1,27		3	7,4
1 % - 150 MESH	5,53	1,42		2,1	7,88
1 % - 300 MESH	6,32	1,65		2,3	8,68
2 % - 150 MESH	5,16	1,49		1,9	8,23
2 % - 300 MESH	5,21	1,41		2,5	7,36

Nota: Ca^{2+} - Mg^{2+} - Al^{3+} - Extrator: KCl - 1 mol/L

H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0 SB - Soma de Bases Trocáveis

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

Houve redução dos teores de Ca depois do cultivo, reflexo da extração vegetal e possíveis perdas. Entre os tratamentos com biochar, a concentração de 1% em 300 mesh mostrou melhor retenção de Ca em relação ao solo pós-plantio sem biochar, sugerindo que o biochar pode atuar como reservatório de cátions básicos.

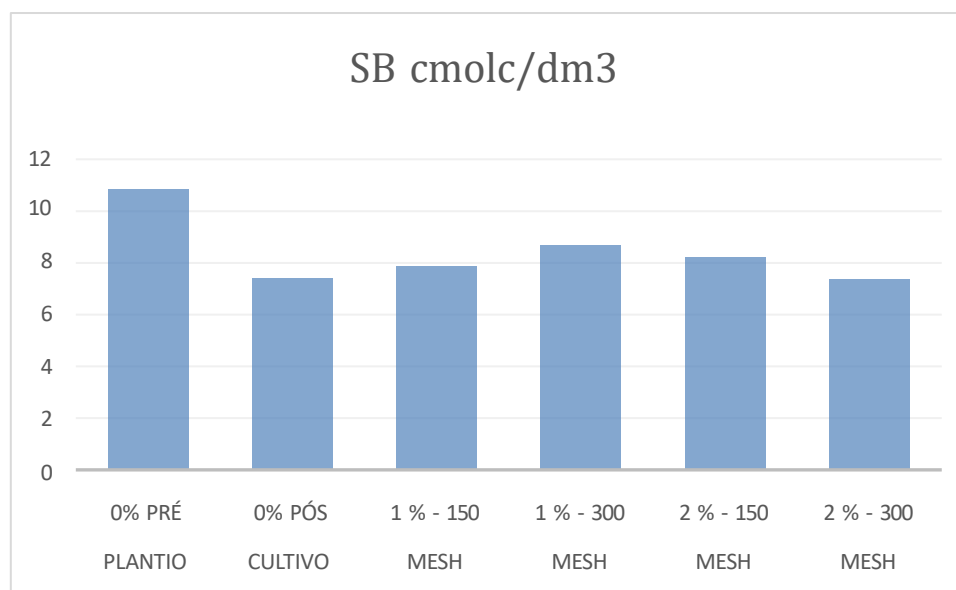
O Mg mostrou pequena variação entre pré e pós-plantio, indicando menor extração relativa em comparação a outros cátions. Nos tratamentos com biochar, a melhor retenção de Mg foi observada na concentração de 1% em 300 mesh, indicando que o biochar pode contribuir para manter níveis de Mg favoráveis.

As análises indicaram ausência de Al trocável em todas as etapas e tratamentos, mostrando não toxicidade.

O parâmetro H + Al aumentou no pós-plantio em relação ao pré-plantio. Nos tratamentos com biochar, observam-se valores intermediários, indicando que o biochar ajuda a diminuir variações de acidez decorrentes do cultivo.

A soma de bases diminuiu após o cultivo, resultado da extração vegetal e perda por lixiviação.

Figura 10 – Gráfico de análise dos dados do biochar Soma de Bases



Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

Nos tratamentos com biochar, o SB foi melhor mantido, com destaque para concentração de 1% na granulometria de 300 mesh a maior SB entre as alternativas testadas. Isso demonstra que o biochar contribui para preservar a reserva de cátions essenciais no solo. O uso do biochar da casca de café, portanto, mostrou-se útil para mitigar a diminuição da soma de bases durante o cultivo.

Tabela 9 - Análise de t, T, V, m e P-rem

Tratamentos	t cmolc/dm³	T cmolc/dm³	V %	m	% P-rem mg/L
0% PRÉ PLANTIO	10,82	12,62	5,7	0	16,5
0% PÓS CULTIVO	7,4	10,40	71,2	0	6,7
1% - 150 MESH	7,88	9,98	79	0	13,9
1% - 300 MESH	8,68	10,98	79,1	0	14,3
2% - 150 MESH	8,23	10,13	81,2	0	12,9
2% - 300 MESH	7,36	9,86	74,6	0	15

Nota: t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0 V - Índice de Saturação por Bases

m - Índice de Saturação por Alumínio P-rem - Fósforo Remanescente

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

A capacidade de troca catiônica efetiva (t) segue o mesmo padrão da SB. Nos tratamentos com biochar, observou-se uma manutenção ou incremento relativo de t em relação ao pós-plantio

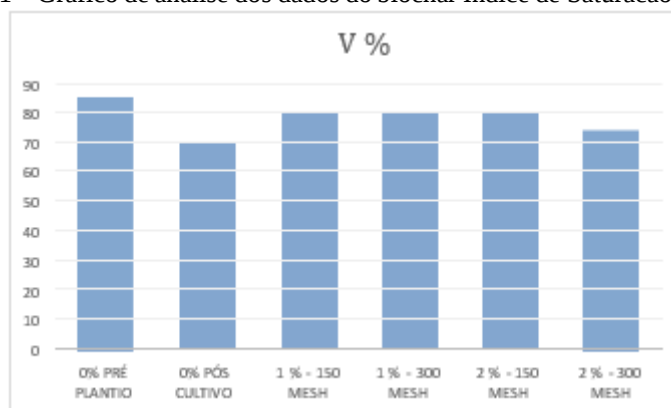
sem biochar, o que indica que o biochar aumenta a habilidade do solo em reter e disponibilizar cátions durante o cultivo.

Se a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} , pode-se dizer que esse é um solo bom para a nutrição das plantas. Por outro lado, se grande parte da CTC está ocupada por cátions potencialmente tóxicos como H^{+} e Al^{3+} este será um solo pobre. Um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade para reter cátions em forma trocável; nesse caso, não se devem fazer as adubações e as calagens em grandes quantidades de uma só vez, mas sim de forma parcelada para que se evitem maiores perdas por lixiviação. (RONQUIM, 2010).

Quanto a CTC a pH 7,0 (T) após o cultivo, exibiu redução em T; O tratamento com biochar na concentração de 1% em 300 mesh resultou em uma retenção maior do que o sem biochar. Isso indica que o biochar pode aumentar a reserva total de sítios de troca que é um atributo desejável para solos com tendência à perda de fertilidade.

O índice V diminuiu no pós-plantio, com biochar, houve recuperação parcial do V. O tratamento na concentração de 2% em 150 mesh apresentou a maior elevação relativa do índice V.

Figura 11 – Gráfico de análise dos dados do biochar Índice de Saturação por Bases



Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

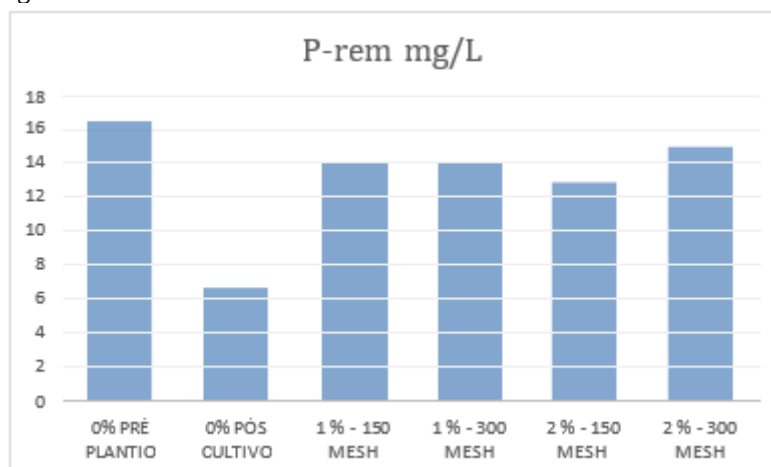
A maioria das culturas apresenta boa produtividade quando no solo é obtido valor V% entre 50 e 80% e valor de pH entre 6,0 e 6,5. (RONQUIM, 2010). Com isso pode-se perceber uma capacidade de retenção da fertilização do solo pelo uso do biochar.

Em todas as amostras o índice m é nulo, confirmando que não houve saturação por alumínio trocável em qualquer etapa.

O P-Rem diminuiu claramente no pós-plantio, refletindo extração pelo cultivo. Entre os tratamentos com biochar, houve variação os tratamentos mantiveram P-Rem em níveis próximos do pré-plantio, indicando capacidade do biochar de minimizar perdas e reter frações de fósforo

disponíveis, em especial para a concentração de 1% em 150 mesh, que podem ser melhor visualizados pelo gráfico.

Figura 12 – Gráfico de análise dos dados do biochar Fósforo Remanescente



Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

Além da análise química foram realizadas também análises físicas no mesmo laboratório para verificar o efeito das diferentes granulometrias

Tabela 10 - Análise de Areia Grossa, Areia Fina, Silte e Argila

Tratamentos	Areia Grossa kg/kg	Areia Fina kg/kg	Silte kg/kg	Argila kg/kg
0% PRÉ PLANTIO	0,149	0,122	0,178	0,551
2 % - 150 MESH	0,1	0,137	0,188	0,574
2 % - 300 MESH	0,097	0,110	0,174	0,620

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

A análise granulométrica evidenciou alterações relevantes na distribuição das frações do solo após a aplicação do biochar de casca de café. A fração de areia grossa, responsável por favorecer a aeração e a drenagem rápida, apresentou redução relativa em comparação ao solo controle.

Esse resultado é positivo, pois a areia grossa quase não retém água nem nutrientes, e sua diminuição indica maior potencial de retenção de umidade e elementos nutritivos, efeito diretamente associado à presença do biochar.

No caso da areia fina, observou-se um comportamento distinto, com aumento em 150 mesh. Como essa fração possui maior capacidade de reter água em relação à areia grossa, o incremento sugere que o biochar contribuiu para melhorar a disponibilidade hídrica no solo.

O silte, por sua vez, manteve-se em níveis equilibrados entre os tratamentos. Essa fração auxilia na retenção de água, mas apresenta baixa coesão, o que em excesso pode favorecer a erosão e a desagregação do solo em condições de chuva intensa. Os resultados demonstram que a adição do biochar não elevou de forma significativa a fração silte, contribuindo assim para a manutenção da estabilidade estrutural do solo.

A fração argila apresentou incremento nos tratamentos com biochar, resultado que se mostra relevante, uma vez que essas partículas microscópicas possuem elevada superfície específica e conferem ao solo maior capacidade de retenção de água e nutrientes, devido à sua alta CTC (capacidade de troca catiônica).

Tabela 11 – Classificação Textural e Classificação ZARC

Tratamentos	Classificação Textural	Tipo de solo	Classificação ZARC	
			Classe AD	Quantidade AD mm/cm
0% PRÉ PLANTIO	Argila	3	AD6	1,72
2 % - 150 MESH	Argila	3	AD6	1,79
2 % - 300 MESH	Muito Argilosa	3	AD6	1,92

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa

A análise conjunta da classificação textural e hídrica do solo revelou mudanças importantes decorrentes da aplicação do biochar de casca de café. Inicialmente, o solo foi classificado como argila, enquanto no tratamento de 300 mesh passou para a categoria de muito argiloso.

Esse incremento de argila está diretamente associado ao aumento da capacidade de retenção de água e da fertilidade natural do solo, dada a maior CTC (capacidade de troca catiônica) que essas partículas conferem.

Embora vantajosa em regiões secas, essa textura mais argilosa demanda atenção em áreas

mal drenadas, devido ao risco de encharcamento e compactação.

No enquadramento pelo ZARC (Zoneamento Agrícola de Risco Climático), todos os cenários se mantiveram como Tipo 3 – solo argiloso, caracterizado por boa retenção de água, maior fertilidade e disponibilidade hídrica adequada para o desenvolvimento das plantas de acordo com MONTEIRO et al., 2021

Quanto à avaliação pela Classe AD, observou-se que todos os tratamentos foram classificados como AD6, indicando um nível elevado de capacidade de retenção de água confirmado por MONTEIRO et al., 2021

Por fim, a análise da quantidade de AD (mm/cm) mostrou incremento nos valores após a aplicação do biochar em relação ao solo inicial. Esse resultado indica maior volume de água armazenado e disponibilizado para as plantas, o que representa um efeito benéfico direto para a resiliência das lavouras em períodos de estiagem. Dessa forma, a presença do biochar atua como estratégia de manejo sustentável, melhorando a capacidade do solo em sustentar a produção agrícola, ao mesmo tempo em que contribui para maior eficiência no uso da água.

Somando as análises químicas e físicas o avanço do desenvolvimento da *Allium schoenoprasum* fornece uma perspectiva visual do efeito do biochar:

Figura 13: Plantio da *Allium schoenoprasum* - 20/12/2024



Fonte: Registro do autor

Figura 14: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 03/01/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 15: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 21/02/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 16: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 24/03/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 17: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 07/04/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 18: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 01/05/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 19: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 21/05/2025



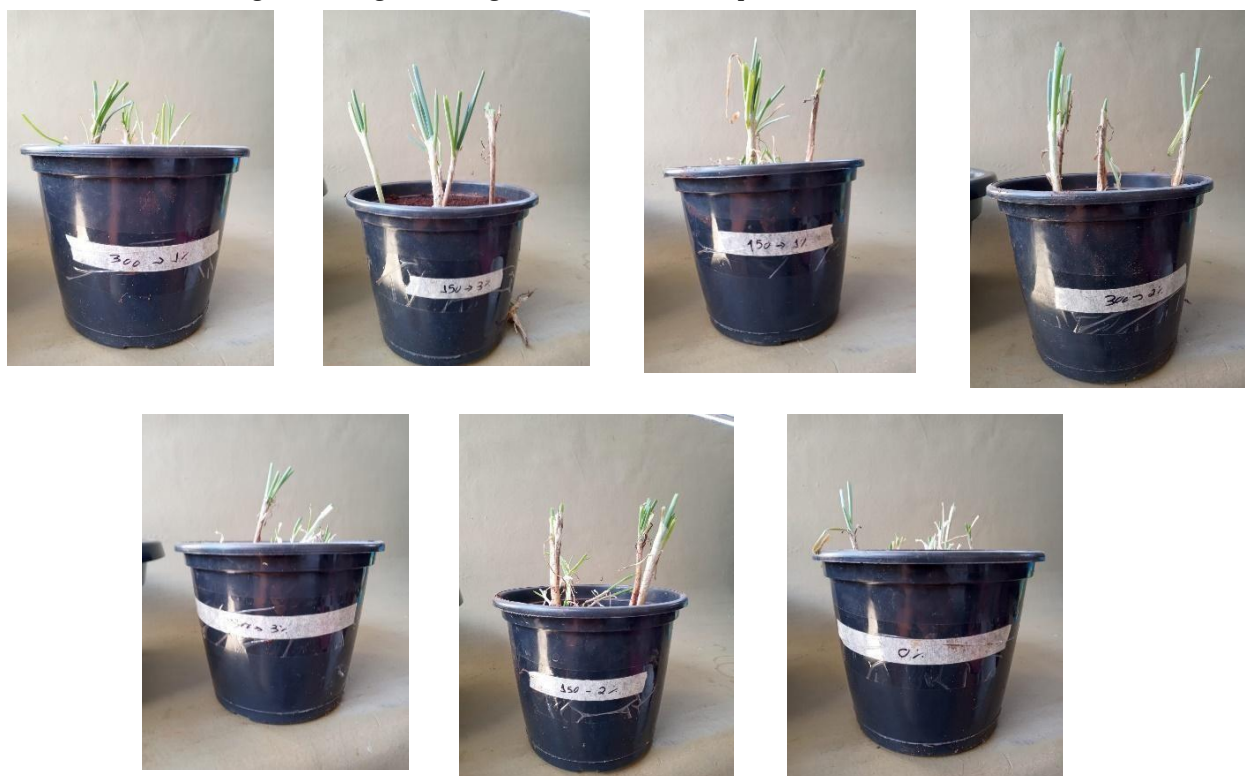
Fonte: Registro do autor

Figura 20: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 16/06/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 21: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 17/07/2025



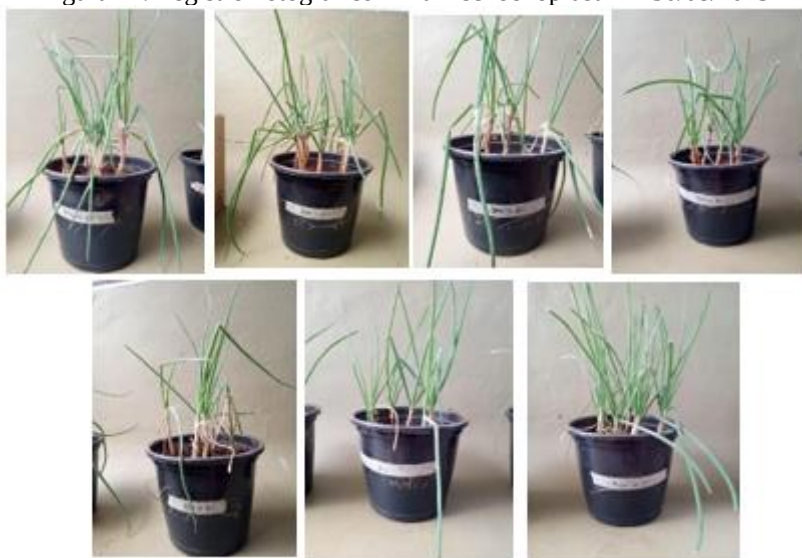
Fonte: Registro do autor

Figura 22: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 13/08/2025



Fonte: Registro do autor

Figura 22: Registro Fotográfico *Allium schoenoprasum* – 30/08/2025



Fonte: Registro do autor

Durante o período experimental, observou-se um crescimento mais acentuado das plantas de cebolinha submetidas à aplicação de biochar, apresentando folhas de maior altura e aspecto mais vistoso em comparação ao tratamento controle (sem biochar). Além do desenvolvimento superior, verificou-se que os vasos tratados com biochar apresentaram menor incidência de pragas laterais, o que reforça o potencial do material não apenas como condicionador de solo e promotor de fertilidade, mas também como aliado na redução de fatores bióticos que comprometem o cultivo.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa demonstrou que a utilização da casca de café para a produção de biochar constitui uma alternativa viável e sustentável, capaz de conciliar a gestão de resíduos agrícolas com benefícios agrônômicos e ambientais. O processo de pirólise lenta apresentou conversão média de 78,61%, evidenciando eficiência na transformação da biomassa em um material estável e rico em carbono.

Os resultados químicos e físicos mostraram que a aplicação do biochar promoveu aumento do pH, maior retenção de nutrientes essenciais (K, Ca, Mg e P), preservação da soma de bases e incremento da capacidade de troca catiônica. Além disso, observou-se melhora nas propriedades físicas do solo, com aumento da fração argila e areia fina, favorecendo a retenção de água e nutrientes sem comprometer a estabilidade estrutural.

Do ponto de vista ambiental, confirmou-se o papel estratégico do biochar como sumidouro de carbono estável, com potencial significativo para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, em consonância com os compromissos do Brasil frente ao Protocolo de Quioto, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e às discussões da COP 30.

Assim, o biochar proveniente da casca de café se apresenta como uma ferramenta promissora para a agricultura de base sustentável, contribuindo simultaneamente para o aumento da fertilidade do solo, a redução da dependência de insumos químicos, o sequestro de carbono e a implementação de práticas alinhadas à economia circular. Os resultados obtidos reforçam a importância de expandir pesquisas e aplicações em diferentes sistemas agrícolas, consolidando o biochar como tecnologia estratégica para o futuro da produção agrícola e da sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

RONQUIM, Carlos Cesar. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, **Embrapa** Monitoramento por Satélite, Campinas, SP, n. 8, nov. 2010. ISSN 1806-3322.

MONTEIRO, J. E. B. de A. et al. Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). [s.l.]: **Embrapa Agricultura Digital**, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1136438/zoneamento-agricola-de-risco-climatico-zarc>

Gomes H.; et al. Removal of Azoxystrobin and Deltamethrin from Water Using Activated Biochar from *Moringa oleifera* L. Wood: Synthesis, Characterization, and Adsorption Study. **Molecules**. 2025 Jun 26;30(13):2757. doi: 10.3390/molecules30132757. PMID: 40649275; PMCID: PMC12251124.

Matiello, J. B., Santinato, R.; Garcia, A. W. R.; Almeida, S. R.; Fernandes, D. R. (2010). Cultura de Café no Brasil: manual de recomendações. Rio de Janeiro: **Fundação Procafé**, 546p

YAMEEN, Muhammad Zubair; NAQVI, Salman Raza; JUCHELKOVÁ, Dagmar; KHAN, Muhammad Nouman Aslam. Harnessing the power of functionalized biochar: progress, challenges, and future perspectives in energy, water treatment, and environmental sustainability. **Biochar**, v. 6, n. 25, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00316-3>.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *Rumo à COP30*. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/rumo-a-cop-30>. Acesso em: 16 ago. 2025.

Ministério do Meio Ambiente. *Protocolo de Quioto*. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em: 16 ago. 2025.

PNUD BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>.

SHOUDHO, Kishan Nandi; et al. Biochar in global carbon cycle: Towards sustainable development goals. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, [S.l.], v. 8, p. 100409, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100409>

Zhang Q, Masabni J, Niu G. Organic fertilizer type and dose affect growth, morphological and physiological parameters, and mineral nutrition of watermelon seedlings. **PeerJ**. 2024 Feb 21;12:e16902. doi: 10.7717/peerj.16902. PMID: 38406293; PMCID: PMC10893865.

Qi JQ, Yuan HY, Sun SC, Zama EF, Tao BX, Liu J, Zhang BH. Biochar amendment alters rare microbial taxa and enhances wheat growth in alkaline farmland: insights into soil microbiome dynamics. **Front Microbiol**. 2025 May 21;16:1563712. doi: 10.3389/fmicb.2025.1563712. PMID: 40469741; PMCID: PMC12136494.

Wang G, Kou L, Li C, Xu B, Wu Y. Enhanced Degradation of Phenol in Aqueous Solution via Persulfate Activation by Sulfur-Doped Biochar: Insights into Catalytic Mechanisms and Structural Properties. **Nanomaterials (Basel)**. 2025 Jun 24;15(13):979. doi: 10.3390/nano15130979. PMID: 40648687; PMCID: PMC12250925.

IBGE. Produção de Café. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cafe/mg>. Acesso em: 27 jan. 2025

FERREIRA, Lucas Tadeu; CAVATON, Thiago. Produção total de café em nível mundial foi estimada em 174,9 milhões de sacas de 60kg para doze meses. **Embrapa Café**, Brasília, DF, 12 mar. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/99010562/artigo---producao-total-de-cafe-em-nivel-mundial-foi-estimada-em-1749-milhoes-de-sacas-de-60kg-para-doze-meses>

ZAGO, V. C. P. ; BARROS, R. T. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 219-228, mar./abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376>