

USO DO BIOCHAR COMO FERTILIZANTE E SUAS INLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO

THE USE OF BIOCHAR AS FERTILIZER AND ITS INFLUENCE ON THE CHEMICAL, PHYSICAL, AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF THE SOIL

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.054-007>

Stefhany Pereira Reis

Acadêmica do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3700384147981762>

Mariana Thereza Rodrigues Viana

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8547543495862002>

Luiz Leonardo Ferreira

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8177473980862031>

Glicélia Pereira Silva

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6421558847529228>

Deborah Amorim Martins

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8714038892552194>

Gildomar Alves dos Santos

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-4367>

Andrisley Joaquim da Silva

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0084-0264>

Zaqueu Henrique de Souza

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7733-4768>

Jonathan Goularte Silva

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2445-0634>

Diego Oliveira Ribeiro

Docente do curso de Agronomia do Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2336-3042>

Resumo

Este estudo aborda o biochar (biocarvão) como uma tecnologia estratégica para a agricultura sustentável e mitigação das mudanças climáticas. O objetivo foi descrever e analisar as características físico-químicas e biológicas do biochar, bem como seus impactos nas propriedades do solo, produtividade agrícola e sequestro de carbono. A metodologia consistiu em uma revisão de literatura qualitativa e descritiva, baseada na análise de artigos científicos, teses e boletins técnicos obtidos em bases como Scielo, Web of Science e Google Acadêmico. Os resultados demonstraram que o biochar promove melhorias nas propriedades físicas do solo, reduzindo a densidade aparente, aumentando a porosidade e favorecendo a retenção de água, especialmente em solos degradados ou arenosos. Quimicamente, atua como condicionador do solo, elevando o pH e a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), o que contribui para maior retenção de nutrientes e menor lixiviação. No aspecto biológico, o material favorece a microbiota do solo, aumentando o carbono da biomassa microbiana e estimulando enzimas relacionadas à ciclagem de nutrientes. Para fundamentação do estudo, foram analisados documentos técnico-científicos publicados entre 2011 e 2026. Apesar dos benefícios observados, a eficiência do biochar depende da matéria-prima utilizada e das condições de produção, além de existirem desafios relacionados à padronização do produto, custos logísticos e necessidade de estudos de longa duração para garantir segurança ambiental.

Palavras-chave: Biochar; Fertilidade do Solo; Pírolise; Sequestro de Carbono; Sustentabilidade Agrícola.

Abstract

This study addresses biochar as a strategic technology for sustainable agriculture and climate change mitigation. The objective was to describe and analyze the physicochemical and biological characteristics of biochar, as well as its impacts on soil properties, agricultural productivity, and carbon sequestration. The methodology consisted of a qualitative and descriptive literature review, based on the analysis of scientific articles, theses, and technical bulletins obtained from databases such as Scielo, Web of Science, and Google Scholar. The results demonstrated that biochar promotes improvements in the physical properties of the soil, reducing apparent density, increasing porosity, and favoring water retention, especially in degraded or sandy soils. Chemically, it acts as a soil conditioner, raising the pH and Cation Exchange Capacity (CEC), which contributes to greater nutrient retention and less leaching. In the biological aspect, the material favors the soil microbiota, increasing the carbon of the microbial biomass and stimulating enzymes related to nutrient cycling. For the study's foundation, technical-scientific documents published between 2011 and 2026 were analyzed. Despite the observed benefits, the efficiency of biochar depends on the raw material used and the production conditions, in addition to challenges related to product standardization, logistical costs, and the need for long-term studies to ensure environmental safety.

Keywords: Agricultural Sustainability; Biochar; Carbon Sequestration; Pyrolysis; Soil Fertility.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural que, apesar de se renovar constantemente por processos físicos e bioquímicos, possui taxas de formação extremamente lentas, sendo considerado não renovável na escala humana (Resende et al., 2025). A exploração intensiva desse recurso para a produção global de alimentos tem causado a degradação de cerca de 25% das terras aráveis do mundo, resultando em erosão, perda de matéria orgânica, compactação e redução da biodiversidade (Resende et al., 2025). Diante da necessidade de sistemas agrícolas mais sustentáveis, o biocarvão, ou biochar, tem despertado interesse crescente devido ao seu potencial na gestão de resíduos, remediação ambiental e melhoria da fertilidade do solo (Lima et al., 2025).

O interesse científico contemporâneo por esse material baseia-se amplamente nas descobertas das Terras Pretas de Índio (TPI) na região amazônica (Glodowska et al., 2016). Esses solos de origem antrópica, formados por populações pré-colombianas, mantêm níveis excepcionais de fertilidade e estabilidade de carbono há milênios, servindo de modelo para o desenvolvimento de condicionadores de solo modernos (Rezende et al., 2011). Assim, o biochar é visto como uma tecnologia capaz de harmonizar a produtividade agrícola com a mitigação das mudanças climáticas (Trazzi et al., 2018).

Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão abrangente sobre as características físico-químicas e biológicas do biochar, analisando sua influência nas propriedades do solo e sua eficácia como estratégia para a melhoria da fertilidade e sequestro de carbono (Lima et al., 2025).

2 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão de literatura de caráter qualitativo e descritivo, com foco na análise de conhecimentos científicos relacionados ao biochar e suas influências nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O estudo foi fundamentado na investigação de artigos científicos, teses, dissertações e boletins técnicos que abordam a utilização do biochar na agricultura, sua produção por pirólise e seus efeitos no sistema solo-planta.

Para a composição do referencial teórico, os materiais foram obtidos em bases de dados científicas reconhecidas, como Scielo, Google Acadêmico e Web of Science, além de repositórios institucionais. O levantamento bibliográfico foi realizado utilizando descritores como “biochar”, “biocarvão”, “pirólise”, “fertilidade do solo” e “sequestro de carbono”.

A seleção das referências considerou a relevância científica, a relação direta com o tema proposto e a atualidade das publicações, priorizando estudos publicados entre os anos de 2011 e 2026. Após a seleção,

os materiais foram analisados de forma comparativa e sistemática, possibilitando a identificação das principais evidências sobre a atuação do biochar como condicionador do solo e seu potencial na mitigação de impactos ambientais e no aumento da qualidade do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SOLO E SUA IMPORTÂNCIA PARA OS SISTEMAS AGRÍCOLAS

O setor agrícola é, de fato, um pilar fundamental da economia brasileira, contribuindo para o desenvolvimento econômico, criação de empregos e distribuição de alimentos para os mercados interno e externo. (Equipe Fieldviw, 2021). A produtividade agrícola está diretamente ligada ao solo, uma vez que é nele que as plantas obtêm os nutrientes essenciais para seu crescimento e desenvolvimento. Ademais, o tipo de solo é fundamental tanto para o plantio quanto para o progresso do setor agropecuário brasileiro (Pes, 2017)

Logo, o solo desempenha um papel crucial como reservatório de carbono, auxiliando na regulação do clima global. A função do solo é prejudicada pela perda de matéria orgânica resultante de práticas agrícolas inadequadas, o que torna imprescindível a implementação de estratégias que incentivem o aumento do carbono no solo e a melhoria de suas características (Lal, 2004; Sohi et al., 2010).

Esse contexto leva à redução da renda dos agricultores e tem um efeito prejudicial na economia como um todo (Eltz; Amado; Lovato, 2005). Ademais, o solo é um corpo natural estruturado, formado por diferentes horizontes e camadas, que são o resultado de processos geológicos, biológicos, químicos e físicos ao longo do tempo (Barros, 2020). A diminuição dos nutrientes no solo brasileiro é causada por vários fatores, entre os quais a ocorrência de chuvas, que contribui para a lixiviação dos nutrientes (Calpar, 2018).

Nesse cenário, a literatura indica que práticas de manejo sustentável são essenciais para manter a qualidade do solo. Na agricultura, aprimora a qualidade do solo, diminui as emissões de N₂O e favorece a microbiota benéfica. Com base em evidências científicas, o biochar se estabelece como uma abordagem eficiente, acessível e promissora para reduzir os efeitos das mudanças climáticas no setor agropecuário (Ramiro, J., Pollo, M.P. 2025).

Portanto, essa aplicação é particularmente importante em regiões afetadas pela mineração, atividades industriais ou uso intensivo de fertilizantes e pesticidas (Ramiro, J., Pollo, M.P. 2025).

3.2 FERTILIDADE DO SOLO E MANEJO SUSTENTÁVEL

A fertilidade do solo é definida pela interação de fatores químicos, físicos e biológicos, que determinam a disponibilidade de nutrientes fundamentais para o crescimento das plantas. A conservação da fertilidade do solo está diretamente ligada à sua gestão adequada, que deve se esforçar para reduzir a perda de nutrientes e garantir o equilíbrio dos sistemas produtivos (Weber; Quicker, 2018).

Nesse contexto, pesquisas como a de Lita et al. (2022) ressaltam a utilização da casca de coco como matéria-prima ideal para a produção de biochar, em virtude de suas características físico-químicas singulares, que englobam elevada capacidade de adsorção e potencial para aumentar a fertilidade do solo.

Portanto, a conversão de biomassa em biochar e sua utilização nos solos têm sido sugeridas como uma das maneiras mais eficazes de reduzir as mudanças climáticas, promovendo o sequestro de carbono no solo (Lehmann et al., 2008). O biochar pode ser utilizado tanto de forma isolada quanto em conjunto com outras fontes de nutrientes, contribuindo para a melhoria das características do solo, aumentando a eficácia do uso de fertilizantes e potencializando o rendimento das culturas (Abiola et al., 2023).

3.3 BIOCHAR: CONCEITO E PRODUÇÃO

O biochar, também chamado de biocarvão, é um material sólido carbonáceo que possui um alto teor de carbono, geralmente superior a 50%. A decomposição térmica da biomassa em condições de ausência ou presença limitada de oxigênio resulta na sua produção (Lehmann & Joseph, 2015). Esse material é principalmente produzido pelo processo de pirólise, que consiste na decomposição térmica de moléculas orgânicas a temperaturas que geralmente variam de 300 °C a 900 °C (Lopes et al., 2023).

De acordo com Weber; Quicker, 2018, a gaseificação, a torrefação e a carbonização hidrotérmica são outros métodos, além da pirólise, empregados para sua síntese. A produção de biochar utiliza uma grande diversidade de biomassas, que inclui desde resíduos agrícolas (como palhas, cascas e borra de café) e florestais (madeira de eucalipto e pinus), até estrumes animais (como cama de frango) e resíduos industriais ou urbanos, como o lodo de esgoto (Lopes et al., 2023).

As características finais do material são diretamente afetadas por variáveis de produção, como temperatura de pico, tempo de residência e taxa de aquecimento (Nobrega et al., 2011). A pirólise lenta, caracterizada por baixas taxas de aquecimento e tempos prolongados, favorece o rendimento sólido, enquanto a pirólise rápida tende a produzir um material de menor granulometria e com decomposição ainda mais lenta no solo (Woiciechowski et al. 2018). Por outro lado, temperaturas mais altas geralmente aumentam o teor de carbono fixo e a área superficial, embora diminuam o rendimento gravimétrico total devido à maior volatilização de compostos (Wang; Wang, 2019).

Para evitar que ocorra a combustão completa, é necessário reduzir a presença de oxigênio, permitindo que o carbono permaneça retido em estruturas mais estáveis, de caráter aromático e policondensado.

3.4 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIOCHAR

O biochar possui propriedades físicas que se caracterizam por uma alta porosidade e uma extensa área superficial específica, características que estão intrinsecamente ligadas à biomassa original e à temperatura de pirólise (Farhangi Abriz et al., 2021). Conforme pesquisas anteriores de Chen et al., 2019 e Rawat et al., 2019, a estrutura porosa abrange desde nanoporos até macroporos, sendo que esses últimos favorecem a aeração do solo e o crescimento de microrganismos benéficos.

No entanto, no contexto do biochar ele tem uma alta capacidade de hidrofobicidade, onde está relacionada à capacidade do material em repelir água, afetando processos como infiltração, retenção hídrica e disponibilidade de água no solo. Essa característica está associada principalmente à presença de estruturas aromáticas e ao grau de carbonização do biochar, sendo geralmente mais pronunciada em materiais produzidos a temperaturas mais elevadas.

Quimicamente, o biochar destaca-se pela presença de grupos funcionais superficiais (como hidroxila, carboxila e carbonila), responsáveis por sua capacidade de troca catiônica (CTC) e afinidade por contaminantes e nutrientes (Xiao et al., 2018). De acordo também com Xiao et al., 2018 o pH do material é predominantemente neutro a alcalino, variando geralmente entre 7,8 e 11,6, o que é atribuído à presença de sais minerais e cinzas formadas durante a carbonização.

Além disso, a composição elementar inclui macro e micronutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, cuja disponibilidade e estabilidade são moldadas pelas condições de pirólise; biocarvões produzidos abaixo de 550 °C costumam reter maiores teores de nutrientes lábeis, enquanto os produzidos acima dessa faixa funcionam melhor como adsorventes (Trazzi, et al. 2018).

3.5 INFLUÊNCIA DO BIOCHAR NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS-FÍSICAS DO SOLO

A adição de biochar resulta em melhorias estruturais importantes, como a diminuição da densidade aparente e o incremento da porosidade total, o que facilita a infiltração de água e diminui a erosão (Lima et al., 2025). Esses efeitos aumentam a capacidade de retenção de água e a disponibilidade hídrica para as plantas, o que é especialmente importante em solos arenosos ou degradados, como os encontrados no semiárido brasileiro (Silva et al., 2017).

O biochar contribui para a melhoria da agregação e estabilidade das partículas do solo ao interagir com a matéria orgânica e minerais, resultando na formação de complexos organominerais estáveis (Resende et al., 2025).

No contexto químico, a utilização de biochar aumenta o pH e a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, funcionando como um corretivo para a acidez e diminuindo a toxicidade do alumínio trocável (Lopes et al., 2023). O material auxilia no aumento dos níveis de carbono orgânico e na retenção de

nutrientes essenciais, atuando como um reservatório de liberação lenta que reduz as perdas por lixiviação (Trazzi et al. 2018).

A presença de sílica nas cinzas do biochar pode ocupar os locais de adsorção de fósforo nas argilas, elevando a disponibilidade desse elemento para as culturas (Torres et al., 2020; Brtnicky et al., 2021). Essas alterações químicas contribuem para tornar a adubação mineral mais eficiente e favorecem a correção de solos que apresentam alto grau de intemperismo.

3.6 INFLUÊNCIA DO BIOCHAR NAS PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DO SOLO

O biochar pode servir como um ambiente favorável para o desenvolvimento da microbiota do solo, oferecendo proteção aos microrganismos contra organismos predadores, como protozoários e ácaros, além de reduzir os efeitos da perda de água devido à sua estrutura porosa (Enaime; Lubken, 2021). Sua aplicação também está relacionada ao aumento do carbono da biomassa microbiana (Cmic) e a alterações na atividade metabólica dos microrganismos, observadas por meio da respiração basal e do quociente metabólico (qCO₂) (Resende et al., 2025). Pesquisas mostram ainda que aplicações em doses moderadas tendem a estimular a atividade microbiana, enquanto quantidades excessivas podem diminuir a decomposição da matéria orgânica nativa em razão do efeito conhecido como priming negativo (Lopes et al., 2023).

Além de influenciar a abundância microbiana, o biochar também pode modificar a diversidade funcional dos microrganismos do solo, promovendo efeitos positivos no índice de Shannon e contribuindo para comunidades mais estáveis e resilientes (Lopes et al., 2023). Sua presença ainda favorece a atividade de enzimas extracelulares importantes nos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes, como β -glicosidase no ciclo do carbono, fosfatases no ciclo do fósforo, urease no ciclo do nitrogênio e arilsulfatase no ciclo do enxofre, além de estimular a atividade microbiana total avaliada pelo diacetato de fluoresceína (FDA) (Lopes et al., 2023).

O biochar também pode beneficiar relações simbióticas no solo, como aquelas estabelecidas com fungos micorrízicos arbusculares, aumentando a densidade de esporos e a produção de glomalina, proteína importante para a agregação e estabilidade estrutural do solo (Vega et al., 2024).

3.7 BIOCHAR COMO ESTRATÉGIA PARA MELHORIA DA FERTILIDADE DO SOLO

Como estratégia de manejo, o biochar funciona como um condicionador que provê nutrientes e melhora a eficiência de fertilizantes minerais aplicados conjuntamente (Stpopa et al., 2023; El-Naggar et al., 2019; Lehmann; Joseph, 2015). A utilização de fertilizantes organominerais granulados à base de biochar tem se mostrado promissora, permitindo uma liberação mais gradual de nutrientes, o que reduz desbalanços nutricionais e favorece culturas de ciclo longo (Vega et al., 2024). Ele é particularmente eficaz

em solos tropicais ácidos e pobres, onde a melhoria da retenção de fósforo e potássio impacta diretamente a produtividade (Barbosa et al., 2025).

O uso de biochar, tanto de forma isolada quanto em combinação com fertilizantes NPK, melhora a eficácia das adubações minerais, diminuindo as perdas por lixiviação e aumentando a fixação no solo (Abiola et al., 2023). Em solos que são muito intemperizados ou arenosos, o uso de biocarvão enriquecido pode funcionar como uma alternativa parcial aos fertilizantes inorgânicos convencionais, promovendo de maneira sustentável a melhoria do estado nutricional das plantas (Vega et al., 2024).

Em culturas como a cana-de-açúcar, a utilização de biochar tem proporcionado maior crescimento das plantas e aumento da produtividade de colmos, resultados relacionados às melhorias no estado nutricional das plantas e nas condições físicas do solo (Vega et al., 2024). Além do fornecimento de nutrientes, o material também contribui para a recuperação de áreas degradadas pela mineração ou pelo uso agrícola intensivo, auxiliando no restabelecimento dos serviços ecossistêmicos do solo (Santos et al., 2023).

Outra característica importante do biochar é sua capacidade de imobilizar metais pesados e outros contaminantes por meio da biorremediação, ampliando sua aplicação para além da fertilidade do solo e favorecendo a segurança ambiental no sistema solo-planta (Silva et al., 2017).

3.8 BIOCHAR E O SEQUESTRO DE CARBONO

O biochar desempenha uma função ecológica importante ao atuar como um sumidouro de carbono de longo prazo, o que é essencial para a mitigação das mudanças climáticas (Nobrega et al., 2011). Ao contrário da matéria orgânica in natura, o carbono presente no biochar é extremamente recalcitrante, permanecendo no solo por períodos que podem variar de centenas a milhares de anos, em função de sua estrutura aromática estável (Trazzi et al. 2018). Esse sequestro acontece quando a biomassa de rápida decomposição é convertida em carbono pirogênico, que é resistente à biodegradação microbiana (Maia et al., 2012).

O uso de biochar contribui para a diminuição das emissões líquidas de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (Rezende et al., 2011). Além do armazenamento direto, o material pode causar um efeito priming negativo, o que retarda a mineralização do carbono orgânico total (COT) nativo do solo e eleva o estoque estável de C (Vega et al., 2024). Essa estabilidade permite que o biochar desempenhe um papel crucial no alcance das metas climáticas globais, como as estabelecidas no Acordo de Paris, ao remover o carbono da atmosfera e armazená-lo de maneira inerte no solo, sendo classificado como uma tecnologia de "carbono negativo" (Vega et al., 2024).

3.9 DESAFIOS E PERSPECTIVAS DO USO DO BIOCHAR NA AGRICULTURA

Embora tenha potencial, a utilização do biochar se depara com obstáculos ligados aos custos de produção e à logística, além da inconsistência na qualidade do produto, que varia conforme a matéria-prima, e à ausência de normas de classificação (Barbosa et al., 2025). Segundo Brtnicky et al. (2021), há preocupações sobre a presença de contaminantes residuais, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), dioxinas e metais pesados, particularmente em biochars derivados de lodos de esgoto.

A aplicação em grande escala requer precauções para prevenir a perda de partículas finas por deriva e os riscos de inalação pelos aplicadores, em razão da baixa densidade e da poeira do material (Nobrega et al., 2011).

Na análise realizada por Vega et al., 2024, as tendências futuras indicam o avanço de tecnologias para o enriquecimento e modificação (ativação) do biochar, a fim de aprimorar características específicas, como a capacidade de sorção de fosfatos ou a remediação de solos salinos. A incorporação do biochar em modelos de economia circular, convertendo resíduos agrícolas e urbanos em insumos de alto valor, reforça a sustentabilidade do setor (Santos et al., 2023). Pesquisas de longo prazo em condições de campo continuam sendo fundamentais para fortalecer as recomendações de doses e entender as interações complexas entre o biochar, a microbiota e o ecossistema agrícola (Trazzi et al. 2018).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão de literatura evidenciou que o biochar apresenta grande potencial como alternativa sustentável para a agricultura e para a redução dos impactos das mudanças climáticas. A partir da análise dos estudos selecionados, verificaram-se que os benefícios desse material estão diretamente relacionados à estabilidade do carbono e à sua estrutura altamente porosa, características responsáveis por diversas melhorias no sistema solo-planta.

Em relação às propriedades físicas do solo, a aplicação de biochar contribui para melhorias estruturais importantes, promovendo redução da densidade aparente e aumento da porosidade. Como consequência, observa-se maior retenção e disponibilidade de água para as plantas, aspecto especialmente relevante em solos arenosos e áreas degradadas.

Quanto às propriedades químicas, o biochar atua como condicionador do solo, favorecendo a elevação do pH e da Capacidade de Troca Catiônica (CTC). Essas alterações aumentam a retenção de nutrientes essenciais, como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, além de reduzir perdas por lixiviação e minimizar problemas relacionados à toxicidade por alumínio.

No aspecto biológico, os estudos apontam que o biochar proporciona condições favoráveis ao desenvolvimento da microbiota do solo, funcionando como abrigo para microrganismos devido à presença

de microporos em sua estrutura. Sua utilização está associada ao aumento do carbono da biomassa microbiana, da diversidade funcional e da atividade enzimática ligada à ciclagem de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Do ponto de vista ambiental, destaca-se a capacidade do biochar de atuar no sequestro de carbono a longo prazo, mantendo o carbono estabilizado no solo por extensos períodos. Entretanto, ainda existem desafios relacionados à variabilidade da matéria-prima, aos custos de produção, à padronização do material e à necessidade de estudos de longa duração que garantam sua viabilidade econômica e segurança ambiental.

DECLARAÇÃO

Declaro (amos) que foram empregadas ferramentas de Inteligência Artificial em etapas específicas deste trabalho, exclusivamente como apoio linguístico, revisão textual, organização, análise auxiliar, mantendo-se a responsabilidade integral pela interpretação, argumentação e resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

ABIOLA, W. A.; DIOGO, R. V. C.; TOVIHOUDJI, P. G.; MIEN, A. K., & SCHALLA, A. Biochar-based smart fertilizers as an option for the sustainable agricultural land management-a bibliometric review.

Frontiers in Soil Science, v. 3, p. 11. 2023.

BARBOSA, Eline Dias et al. Propriedades de Biochars e Sua Eficácia na Retenção de Fósforo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 1, p. 456-470, 2025. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>.

BARROS, José F. C. **Fertilidade do solo e Nutrição das plantas**. Évora 2020. ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA.

BRTNICKY, M.; DATTA, R.; HOLATKO, J.; BIELSKA, L.; GUSIATIN, Z. M.; KUCERIK, J.; HAMMERSCHMIEDT, T.; DANISH, S.; RADZIEMSKA, M.; MRAVCOVA, L.; FAHAD, S.; KINTL, A.; SUDOMA, M.; AHMED, N.; PECINA, V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. **Science of the Total Environment**, 796, p.2-14, 2021.

CALPAR. **Saiba como é a fertilidade dos solos no Brasil**. Publicado: 30/05/2018 18h39. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/parana/especial publicitario/calpar/produtividadesem-fronteiras/noticia/saiba-como-e-a-fertilidade-dos-solos-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 19 out. 2022.

ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; LOVATO, T. **Apostila de manejo e conservação do solo**. Santa Maria, 2005. 102 p.

ENAIME, G.; LÜBKEN, M. Agricultural Waste-Based Biochar for Agronomic Applications. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 8914, 2021.

EQUIPE FIELDVIEW. **Quais são os principais tipos de agricultura praticados no Brasil?** Disponível em: <https://blog.climatefieldview.com.br/tipos-de-agricultura>. Publicado em: 11 nov. 2021 às 19h41min.

FARHANGI ABRIZ, S., YOUSEFI, H., & BAHRAMI, M. (2021). Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis. **Science of the Total Environment**, 775, 145869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145869>

GŁODOWSKA, M., HUSK, B., SCHWINGHAMER, T., & SMITH, D. (2016). Biochar is a growth-promoting alternative to peat moss for the inoculation of corn with a pseudomonad. **Agronomy for Sustainable Development**, 36, 1–10.

LEHMANN, J. et al. Australian climate-carbon cycle feedback was reduced by soil black carbon. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 12, p. 832-835, 2008.

LEHMANN, J., & JOSEPH, S. (2015). **Biochar for environmental management: Science, technology and implementation** (2nd ed.). Routledge

LIMA, Natália Teixeira de et al. Biocarvão: Características químico-físicas e uso na agricultura. Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 6, e7114648949, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v14i6.48949>.

LOPES, Érika Manuela Gonçalves. **Biomassa e diversidade microbiana em solo adubado com biocarvão e cultivado com cana-de-açúcar**. 2023. 59 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) — Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2023

MAIA, C. M. B. F. Biochar: uma nova ferramenta no manejo de solos. In: **SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO FLORESTAL**, 2.; SEMANA DE ESTUDOS FLORESTAIS, 11., 2012, Irati. Anais... Irati: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012.

NÓBREGA, Ísis Patrícia Cardoso. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo**. 2011. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) — Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

PES, Luciano Zucuni Conservação do solo / Luciano Zucuni Pes, Diego Antonio Giacomini. — **Santa Maria**: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico; Rede e-Tec Brasil, 2017. 69 p.: il.; 28 cm ISBN: 978-85-9450-024-3

RAMIRO, J., POLLO, M.P. **Biochar Biochar: Um Potencial Sustentável para Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas na Agricultura e Pecuária**. CCarbon/USP, 2026. Disponível em: <https://ccarbon.usp.br/pt/biochar-um-potencial-sustentavel-para-mitigacao-e-adaptacao-as-mudancas-climaticas-na-agricultura-e-pecuaria/>. Acesso em: April 25, 2026

RESENDE, Gabriel Cunha et al. **Atributos físicos e químicos como indicadores de qualidade do solo**. [S. l.]: Atena Editora, 2025. cap. 8. DOI: 10.22533/at.ed.961112518038.

SANTOS, Andressa Luiza Machado dos et al. Biochar: aplicações na remediação ambiental e no sequestro de carbono. In: **Microbiologia e Biotecnologia ambiental in foco: tema sustentabilidade**. [S. l.]: Atena Editora, 2023. v. 2, cap. 6, p. 110-122

SANTOS, Andressa Luiza Machado dos et al. Biochar: aplicações na remediação ambiental e no sequestro de carbono. In: **Microbiologia e Biotecnologia ambiental in foco: tema sustentabilidade**. [S. l.]: Atena Editora, 2023. v. 2, cap. 6, p. 110-122.

SILVA, Gualter Guenther Costa da et al. Uso do biochar para fins agrícolas: principais vantagens. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO**, 2., 2017, Campina Grande. Anais... Campina Grande: Realize Editora, 2017.

SILVA, Gualter Guenther Costa da et al. **Uso do biochar para fins agrícolas: principais vantagens**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 2., 2017, Campina Grande. Anais... Campina Grande: Realize Editora, 2017.

STOPA, W.; WRÓBEL, B.; PASZKIEWICZ-JASIŃSKA, A.; STRZELCZYK, M. Effect of Biochar Application and Mineral Fertilization on Biomass Production and Structural Carbohydrate Content in Forage Plant Mixture. **Sustainability**, 15, 14333. <https://doi.org/10.3390/su151914333>, 2023.

TRAZZI, Paulo André et al. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832128>.

VEGA, César Florentino Puma. **Propriedades químicas e biológicas do solo enriquecido com biocarvão e cultivado com cana-de-açúcar**. 2024. 80 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) — Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2024.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, 2019.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240–261, 2018.

WOICIECHOWSKI, Thiago et al. Nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v. 28, n. 4, p. 1455-1464, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509835053>.

XIAO, X., CHEN, B., CHEN, Z., ZHU, L., & SCHNOOR, J. L. (2018). Insights into multilevel structures of biochars and their potential environmental applications: A critical review. **Environmental Science & Technology**, 52, 5027–5047.