

Biocarvão: Características químico-físicas e uso na agricultura. Uma revisão

Biochar: Physicochemical characteristics and use in agriculture. A review

Biocarbón: Características físico-químicas y uso en la agricultura. Una revisión

Recebido: 23/05/2025 | Revisado: 15/06/2025 | Aceitado: 16/06/2025 | Publicado: 19/06/2025

Natália Teixeira de Lima¹

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8820-2257>
Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil
E-mail: natalialima.agro@hotmail.com

Thiago Francisco de Souza Carneiro Neto¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6026-4425>
Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil
E-mail: thiagofs_10@hotmail.com

Marina Souza Pereira Matos¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-7212>
Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil
E-mail: Marina.souza@aluno.ifsertao-pe.edu.br

Fabio Freire de Oliveira¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7798-6339>
Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil
E-mail: fabio.freire@ifsertao-pe.edu.br

Cicero Antônio de Sousa Araújo¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1496-7960>
Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil
E-mail: cicero.araujo@ifsertao-pe.edu.br

Gilberto Saraiva Tavares Filho²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3360-4022>
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
E-mail: gilfilho753@hotmail.com

Resumo

O biochar tem despertado interesse crescente devido ao seu amplo potencial de aplicação na gestão de resíduos, geração de energia renovável, sequestro de carbono, mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE), bem como na remediação de solos e corpos hídricos, bem como seu potencial para melhorar a fertilidade do solo e promover o crescimento de plantas. Esta revisão tem como objetivo descrever aspectos químicos, físicos e biológicos dos biochars e sua aplicação tecnológica na agricultura. Para a realização deste trabalho, foram utilizados os descritores “biochar”, “biochar”, “biochar e agrícola” e “aplicação de biochar” para o levantamento bibliográfico. Observou-se a partir da revisão que o biochar possui características físico-químicas variáveis e inconsistentes, dependendo de sua origem, temperatura de pirólise e composição mineral da biomassa original. De forma geral, o biochar apresenta características importantes para solos desérticos ou com baixa pluviosidade, como os solos do semiárido brasileiro, uma vez que apresenta os efeitos de redução da densidade do solo, aumento da porosidade do solo e, conseqüentemente, aumento da retenção de água no solo, aumento da disponibilidade hídrica para as plantas e maior eficiência no uso da água. A revisão mostrou que a relação C/N do solo aumenta com o uso de biochar, o que contribui para a atividade microbiana do solo, promovendo mudanças positivas. Também foi demonstrado que aumenta o pH do solo, favorecendo a disponibilidade em solos ácidos, em detrimento da função fertilizante.

Palavras-chave: Biochar; Propriedades hidráulicas; Melhoria da qualidade do solo.

Abstract

Biochar has aroused increasing interest due to its wide potential for application in waste management, renewable energy generation, carbon sequestration, mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions, as well as in the remediation of soils and water bodies, as well as its potential to improve soil fertility and promote plant growth. This review aims to describe chemical, physical and biological aspects of biochars and their technological application in agriculture. To carry out this work, the descriptors “biochar”, “biochar”, “biochar and agricultural” and “biochar application” were used for the bibliographic survey. It was observed from the review that biochar has variable and inconsistent

¹ Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IF-SERTÃO), Campus Petrolina Zona Rural, Petrolina, PE, Brasil.

² Universidade Federal de Pernambuco, Proten-DEN, Recife, PE, Brasil.

physicochemical characteristics, depending on its origin, pyrolysis temperature and mineral composition of the original biomass. In general, biochar has important characteristics for desert soils or soils with low rainfall, such as the soils of the Brazilian semiarid region, since it has the effects of reducing soil density, increasing soil porosity and, consequently, increasing water retention in the soil, increasing water availability for plants and greater efficiency in water use. The review showed that the soil C/N ratio increases with the use of biochar, which contributes to the microbiological activity of the soil, promoting positive changes. It was also shown that it increases soil pH, favoring availability in acidic soils, to the detriment of the fertilizer function.

Keywords: Biochar; Hydraulic properties; Improving soil quality.

Resumen

El biocarbón ha despertado un creciente interés debido a su amplio potencial de aplicación en la gestión de residuos, la generación de energía renovable, el secuestro de carbono, la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como en la remediación de suelos y cuerpos de agua, así como su potencial para mejorar la fertilidad del suelo y promover el crecimiento vegetal. Esta revisión tiene como objetivo describir los aspectos químicos, físicos y biológicos del biocarbón y su aplicación tecnológica en la agricultura. Para llevar a cabo este trabajo, se utilizaron los descriptores “biocarbón”, “biocarbón”, “biocarbón y agricultura” y “aplicación del biocarbón” para la revisión bibliográfica. Se observó a partir de la revisión que el biocarbón tiene características fisicoquímicas variables e inconsistentes, dependiendo de su origen, temperatura de pirólisis y composición mineral de la biomasa original. En general, el biocarbón tiene características importantes para suelos desérticos o suelos con baja pluviosidad, como los suelos de la región semiárida brasileña, ya que tiene los efectos de reducir la densidad del suelo, aumentar la porosidad del suelo y, en consecuencia, aumentar la retención de agua en el suelo, aumentar la disponibilidad de agua para las plantas y una mayor eficiencia en el uso del agua. La revisión demostró que la relación C/N del suelo aumenta con el uso de biocarbón, lo que contribuye a la actividad microbiana del suelo, promoviendo cambios positivos. También se demostró que aumenta el pH del suelo, favoreciendo su disponibilidad en suelos ácidos, en detrimento de su función fertilizante.

Palabras clave: Biocarbón; Propiedades hidráulicas; Mejora de la calidad del suelo.

1. Introdução

Nos últimos anos, o biocarbão tem despertado crescente interesse devido ao seu amplo potencial de aplicação na gestão de resíduos, na geração de energia renovável, no sequestro de carbono, na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), bem como na remediação de solos e corpos hídricos. (Kuppusamy et al., 2016; Lehmann & Joseph, 2015), além do seu potencial para melhorar a fertilidade dos solos e promover o crescimento das plantas.

Conforme definido por Lehman & Joseph, o biocarbão é um produto da carbonização da biomassa (lingocelulósica) em um ambiente de oxigênio limitado com uma temperatura relativamente baixa (<700 °C) (Lehman & Joseph, 2015). A matéria-prima de biomassa para a produção de biocarbão inclui matéria orgânica, como resíduos agrícolas, resíduos florestais e esterco (Sun et al., 2015). Geralmente, o biocarbão pode ser produzido usando várias tecnologias de decomposição termoquímica, pirólise, carbonização hidrotermal, gaseificação e torrefação (Yuan et al., 2019).

Assim, o biocarbão pode ter implicações essenciais no desenvolvimento de uma economia circular na agricultura, uma vez que pode ser integrado em práticas convencionais de fertilização, especialmente em sistemas de produção de alimentos com gestão orgânica (Jindo et al., 2020). Também pode ser uma estratégia sustentável para a gestão de resíduos de poda em fazendas: por exemplo, grandes quantidades de podas de pomares são geradas anualmente causando um problema ambiental se não forem adequadamente descartadas (Di Blasi et al., 1997). Dessa maneira, a presente revisão tem por objetivo descrever aspectos químicos, físicos e biológicos dos biocarbões e sua aplicação tecnológica na agricultura.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa de natureza qualitativa (Pereira et al., 2018), por meio de revisão bibliográfica (Snyder, 2019) do tipo narrativa (Casarin et al., 2020; Rother, 2007).

De acordo com Caldas (1986) a pesquisa bibliográfica representa a “coleta e armazenagem de dados de entrada para a revisão, processando-se mediante levantamento das publicações existentes sobre o assunto ou problema em estudo, seleção,

leitura e fichamento das informações relevantes”. Para a realização do presente trabalho, utilizam-se os descritores “biocarvão”, “*biochar*”, “*biochar and agricultural*” e “aplicação de biocarvão”, para o levantamento bibliográfico dos artigos, livros e resumos expandidos de congressos, que discutissem o tema do biocarvão, como uma tecnologia para a agricultura, nas bases de dados como Scielo, Periódicos CAPES, Web of Science e Google Acadêmico.

3. Resultados e Discussão

3.1 O biocarvão

O biocarvão ou carbono negro pirogênico (*biochar*, em inglês) é um produto carbonáceo, isto é, rico em carbono (>50%), obtido da decomposição térmica da biomassa sob uma presença limitada ou total ausência de oxigênio – processo conhecido como pirólise – (Lehmann & Joseph, 2015; Mangrich et al., 2011), com rendimento médio de biocarvão recuperado por massa de cerca de $\geq 50\%$ da biomassa utilizada (Laghari et al., 2015). O termo *biochar* é a união das palavras em inglês *biomass* (biomassa) e *charcoal* (carvão) (Kalinke, 2019).

Seu uso ganhou imenso interesse desde que os materiais orgânicos carbonizados foram descobertos em solos amazônicos, conhecido como Terra Preta de Índios, formada pelos índios pré-colombianos, que são altamente férteis e escuros. (Parikh et al., 2014). Alguns pesquisadores calculam que esses solos escuros ocupem 1% (63 mil.km²) de toda a área de floresta na Amazônia, mas outras estimativas atingem até 10% (Mangrich et al., 2011).

O uso do biocarvão não é uma invenção moderna e, de fato, existe desde os tempos pré-históricos, onde materiais de carbono, como carvão, eram utilizados para correção do solo (Głodowska et al., 2016; Mía et al., 2017). Desse modo, a tendência recente de usar biocarvão como corretivo de solos é baseada principalmente nessas descobertas na região amazônica, onde as práticas de manejo agrícola indígena levaram à criação de grandes manchas de solo escuro (Glaser et al., 2001; Sohi et al., 2009).

A pirólise é o método mais comumente usados para a produção de biocarvão; e é dividido em pirólise rápida, pirólise lenta, pirólise flash, pirólise solar e assistida por micro-ondas (Tan et al., 2017), onde as temperaturas variam de 300 a 1200°C, com mediana de 500°C (Razzaghi et al., 2020). A combustão (ou seja, a queima na presença de ar) se diferencia da pirólise por permitir reter, nas cinzas, apenas 2% a 3% do carbono inicialmente contido na biomassa (Mangrich et al., 2011).

As matérias-primas usadas para a produção de biocarvão variam de produtos à base de madeira (por exemplo, lascas de madeira e pellets de madeira, casca de árvore), resíduos orgânicos e industriais (por exemplo, lodo, estrume) e materiais à base de plantas (folhas, cascas, sementes, espigas) (Razzaghi et al., 2020).

Assim, o biocarvão pode ser misturado com outros materiais e aditivos, como materiais orgânicos frescos, fertilizantes ou outros materiais inorgânicos, incluindo minerais de argila antes da sua aplicação no solo – que será mais discutida à frente –, ou co-compostado, isto é, pode ser tratado pelo processo de compostagem antes de ser usado como corretivo do solo (El-Naggar et al., 2019).

3.2 Características físicas do biocarvão

Uma das principais características físicas do biocarvão é sua porosidade, a qual apresenta grande variabilidade e pode ser classificada em nanoporos (< 0,9 μm), microporos (2–50 μm) e macroporos (> 50 μm) (Downie et al., 2012). Além disso, o tamanho das partículas dos biocarvões varia entre 0,03 e 8,0 mm, com mediana de 2,0 mm (Razzaghi et al., 2020).

A temperatura de pirólise exerce influência significativa na estrutura porosa do biocarvão. Por exemplo, Shaaban et al. (2014) observaram que biocarvões produzidos a 700 °C, com tempo de residência de 3 horas, apresentaram maior área superficial BET (5,5 m²/g) e microporos mais amplos, com diâmetro médio de 7,0 nm (AJENG et al., 2020). De forma

semelhante, Jeffery et al. (2015) constataram que o tamanho médio dos poros foi de 24 μm para biocarvões submetidos a 400 $^{\circ}\text{C}$ e de 17 μm para aqueles submetidos a 600 $^{\circ}\text{C}$.

O elevado grau de porosidade e a ampla área superficial do biocarvão criam um microambiente propício ao crescimento de microrganismos imobilizados, protegendo-os contra predadores naturais da fauna do solo, como ácaros, protozoários, nematoides e colêmbolos (Chen et al., 2019; Rawat et al., 2019). Atkinson et al. (2010) reforçam essa evidência, destacando que os macroporos ($> 50 \mu\text{m}$) contribuem para o desenvolvimento de microrganismos benéficos, além de melhorar a aeração e a hidrologia do solo. No entanto, alguns estudos relatam biocarvões com baixa área superficial BET (Brunauer-Emmett-Teller) e volume de poros, o que pode estar relacionado ao tipo de material de origem submetido à pirólise (Laghari et al., 2015). A estrutura porosa do biocarvão também favorece uma elevada capacidade de adsorção de água e fertilizantes, criando um ambiente ideal para a propagação e atividade de microrganismos do solo.

Análises por microtomografia de raios-X revelaram que o ângulo de contato de uma gota de água desmineralizada em biocarvões secos ao ar varia entre 101° e 118° , o que caracteriza esses materiais como hidrofóbicos. Essa hidrofobicidade é mais pronunciada em biocarvões produzidos a temperaturas mais baixas, como demonstrado por Jeffery et al. (2015), que observaram tempos de penetração da gota de água superiores a 1 minuto em biocarvões produzidos a 400 $^{\circ}\text{C}$, enquanto que em biocarvões de 600 $^{\circ}\text{C}$ o tempo foi inferior a 10 segundos.

Gray et al. (2014) sugerem que a hidrofobicidade pode dificultar a entrada de água nos poros do biocarvão, independentemente do tamanho e da estrutura porosa. Além disso, esses autores observaram uma correlação positiva entre a temperatura de produção do biocarvão e sua capacidade de absorção de água, o que foi atribuído a uma relação inversa entre a temperatura e a quantidade de compostos hidrofóbicos remanescentes na superfície do material.

Dessa forma, uma das implicações práticas desses achados é a recomendação do uso de biocarvões produzidos em temperaturas mais elevadas em solos arenosos ou regiões sujeitas à seca, onde é desejável maximizar os efeitos de retenção de água no solo (Jeffery et al., 2015).

3.3 Características químicas do biocarvão

Análises elementares demonstraram que o conteúdo de Carbono (C) foi em média de 65% e variou de 19 a 88% e dependeu tanto da matéria-prima quanto das condições de pirólise (Razzaghi et al., 2020). Outros resultados de estudos descrevem percentuais entre 25 e 63%, e atribuem a produção de carbono como dependente puramente do tipo de biomassa original, teor de umidade e mais precisamente com a composição mineral na biomassa (Pariyar et al., 2020).

Temperaturas de pirólise superiores a 500 $^{\circ}\text{C}$ produzem biocarvões com teor de carbono $> 80\%$, enquanto o teor de carbono em temperaturas entre 400 e 500 $^{\circ}\text{C}$ varia entre 60 e 80%, e em temperaturas inferiores a 350 $^{\circ}\text{C}$ o teor de carbono fica entre 15 e 60% (Laird et al., 2011; Ronsse et al., 2013).

A relação C/N e teor de nutrientes do biocarvão são parâmetros químicos a serem avaliados. A composição elementar, além do carbono, inclui nitrogênio, hidrogênio e alguns nutrientes, como K, Ca e Mg (Zhang et al. 2015). Em biocarvão de serragem de pinheiro observou-se redução de 66% da relação C/N da matéria-prima e aumento de teores de nutrientes essenciais para as plantas como Ca, P e K (Laghari et al., 2015).

Fenólicos como hidroxila (OH), carboxila (CO), carbonil e grupos éster são os grupos funcionais mais abundantes nas superfícies de biocarvões, onde são responsáveis pelas suas propriedades, como alcalinidade, tamponamento de pH, hidrofobicidade ou hidrofiliabilidade, carga superficial, capacidade de troca catiônica (CTC), sorção induzida por ligação de hidrogênio e melhoria da capacitância (Laghari et al., 2015; Xiao et al., 2018).

Em geral, o pH do biocarvão é neutro para alcalino, variando de 7,83 a 11,67, o que é benéfico para melhorar o pH do solo e melhorar a nitrificação, e mesmo quando misturado ao solo pode não ter um efeito significativo no pH das misturas

(Shaaban et al., 2014; Villagra-Mendoza & Horn, 2018). Contudo, há exceções e o pH pode ser diferente a depender da matéria-prima, bem como em geral as temperaturas de pirólise mais altas aumentam o pH da maioria dos biocarvões (Pariyar et al., 2020), o que pode ser devido à presença de hidrólise de sais de elementos alcalinos e alcalinos como cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) (Gaskin et al., 2008).

A exemplo disso, os biocarvões obtidos de cama de aves (esterco), casca de arroz, pó de serra de pinus, resíduos de alimentos e lodo de fábrica de papel, e preparados em diferentes temperaturas (350°C, 450°C, 550°C e 650°C) apresentaram valores de pH que variaram de 5 a 10,5 (Pariyar et al., 2020).

A pirólise da madeira de mangueira (*Mangifera indica* L.) apresentou pH neutro (7,12) e uma relação C/N de 163, e também apresentou pH na faixa da neutralidade, variando de 6,83 a 7,54, quando misturado a diferentes solos (Villagra-Mendoza & Horn, 2018). Os autores relatam que os níveis de pH podem ser devidos à presença de altos níveis de alcalinos, no caso de arenitos, Ca^{2+} e na franco-arenosa Ca^{2+} e Mg^{2+} (Laird et al., 2011; Yargicoglu et al., 2015).

Do mesmo modo, a capacidade de troca catiônica (CTC) do biocarvão também varia de acordo a matéria-prima utilizada. Pariyar et al. (2020) relataram que o valor de CTC varia de 6,69 a 67,23 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, onde o biocarvão à base de esterco tem o maior valor de CTC seguido pelo biocarvão de lodo de fábrica de papel, pó de serra de pinus, casca de arroz e resíduos de alimentos.

Com relação aos metais pesados, resultados de estudos relatam que a concentração de metais pesados depende puramente da composição do tipo de biomassa e da temperatura de pico de pirólise, onde a concentração de metais aumentou com a temperatura, como por exemplo do biocarvão de cama de aves e lodo de fábrica de papel maior parte da concentração de metais pesados (Pariyar et al., 2020).

3.4 O efeito do biocarvão nas propriedades físico-químicas do solo

Os efeitos do biocarvão nas propriedades físicas do solo são inconsistentes e muito variáveis, principalmente em relação à retenção de água no solo, condutividade hidráulica e estabilidade de agregados, devendo estes efeitos serem investigados “biocarvão por biocarvão” (Jeffery et al., 2015).

Em estudo investigando o efeito da adição de biocarvão nas funções hidráulicas de dois solos texturais, Villagra-Mendoza & Horn (2018) relataram que a adição do biocarvão tem efeitos importantes nas características físicas e hidráulicas de solos arenosos e franco-arenosos, sendo mais evidentes no solo de textura grossa. No mesmo estudo, o biocarvão potencializou a formação de poros estreitos e médios e também aumentou a rigidez de solos de textura grossa, o que segundo os autores pode ser um recurso valioso para melhorar as funções físicas e ajudar a mitigar o impacto de condições extremas de secagem devido à maior retenção de água e à redução da perda rápida de água em condições de secagem (Villagra-Mendoza & Horn, 2018).

Diferentemente, Jeffery et al. (2015) não encontram efeitos significativos da aplicação de biocarvão em um solo arenoso (que potencialmente poderia se beneficiar mais) na retenção de água do solo, água disponível para as plantas e condutividade hidráulica ou estabilidade agregada em dois experimentos de campo separados, em taxas de aplicação de até 50 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ após 5 meses de aplicação.

Ainda, no mesmo estudo, adicionando uma variável na produção do biocarvão, os autores não observaram diferenças na retenção de água no solo e na água disponível para as plantas quando aplicado biocarvões produzidos sob pirólise a 400 e 600°C, apesar da maior porosidade do biocarvão a 600°C (57% contra 48%) (Jeffery et al., 2015), o que em teoria estaria positivamente correlacionada com a temperatura de produção (GRAY et al., 2014). Esses resultados sugerem que a alta porosidade por si só não é suficiente para que o biocarvão afete a retenção de água no solo (Jeffery et al., 2015), bem como o efeito do biocarvão nessa característica do solo é variável.

Razzaghi et al. (2020) ao fazerem uma revisão sistemática e metanálise chegaram à conclusão de que dentre as propriedades físicas do solo investigadas, o biocarvão, em geral, reduziu a densidade do solo e aumentou a disponibilidade de água para as plantas. Mudanças no teor de água do solo retido na capacidade de campo e no ponto de murcha mostraram um aumento nos solos de textura grossa e média, mas diminuíram nos solos de textura fina, sugerindo que o impacto do biochar no teor de água do solo pode ser dependente do tipo de solo (Razzaghi et al., 2020).

No geral, a incorporação de biocarvão no solo demonstrou aumentar o pH do solo, a capacidade de troca de cátions e a quantidade de nutrientes extraíveis, como K, Ca e Mg (por exemplo, Laird et al., 2010; Wang et al., 2014), que são benéficas para a retenção de nutrientes e fertilidade do solo. O biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto melhorou teores de nutrientes do solo, com exceção de K, e elevou os valores dos indicadores de fertilidade do solo representados pela saturação por bases, CTC e a soma de base, mas não alterou o pH do solo (Sousa, 2015).

Assim, no solo que recebeu o biocarvão de lodo de esgoto, a maior diferença entre doses foi verificada para o P cujos teores se elevaram de 0,39 (dose 0) para 100,31 mg.dm⁻³ (dose 100 Mg.ha⁻¹), com incremento de 257 vezes. Enquanto, a concentração de potássio teve pouca variação com a adição do biocarvão (Sousa, 2015).

Do mesmo modo, Silva (2016) relatou que o uso de biocarvão de resíduos de café (casca e borra do café) em Neossolo Regolítico promoveram mudanças nas propriedades químicas do solo, mas nesse caso aumentando o pH, por apresentarem caráter alcalino, e aumentaram os teores de P e K. Com relação ao caráter alcalino, outro estudo sinaliza o contrário, que o pH do biocarvão é neutro e assim não tem um efeito significativo no pH das misturas alteradas (Villagra-Mendoza & Horn, 2018).

Ainda, independentemente do tipo de biocarvão (casca ou borra do café), as maiores doses (16 Mg.ha⁻¹) promoveram alterações nas propriedades microbiológicas do solo, aumentando a biomassa microbiana do solo, o carbono orgânico total e o quociente microbiano, e diminuindo o quociente metabólico (Silva, 2016).

Percebe-se que na literatura que não há um padrão para aumento do teor de K e pH, o que pode ser em função do material que é transformado em biocarvão. O efeito do biocarvão depende da textura, das propriedades do material de origem e das características do processo térmico (Brewer, 2012). Uma vez que o pH do biochar é neutro, não tem um efeito significativo no pH das misturas alteradas (Villagra-Mendoza & Horn, 2018).

3.5 A relação das propriedades do biocarvão e a produtividade de culturas agrícolas

Segundo o estudo de revisão de El-Naggar et al. (2019), o aumento da produtividade das culturas a partir da aplicação de biocarvão é mais comumente observado em solos pobres em nutrientes e degradados (Laghari et al., 2015), enquanto sua eficácia nem sempre é significativa em solos férteis ou saudáveis (Hussain et al., 2017).

Em estudo avaliando as respostas de crescimento do repolho chinês (*Brassica rapa* L.) cultivar do grupo Pak Choi, Forma Peciolada Verde (sinônimo = *B. rapa* L. subsp. *chinensis* (L.) Hanelt) à aplicação de biocarvão, verificou-se que a previsão do modelo mostrou que amassa fresca da parte aérea foi apenas significativamente diferente nos ciclos experimentais ou ciclos de crescimento, e que os tratamentos com biocarvão em substituição ao solo (0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60%) não afetaram significativamente o crescimento dessa cultivar de repolho em comparação com o tratamento do solo nos quatro ciclos de crescimento testados (Song et al., 2020).

No mesmo estudo, chegou-se à conclusão de que a aplicação de biocarvão pode melhorar a retenção de NO₃⁻ e K⁺ no solo, e de que pode potencialmente aumentar o teor de açúcar, bem como a produção de glucosinolatos e flavonoides do repolho 'Pak Choi' sem afetar negativamente seu rendimento (Song et al., 2020). Portanto, sendo indicado pelos autores como um substituto parcial do solo para fins de agricultura urbana.

No plantio de pepino com incorporação de biocarvão e vermicomposto, a aplicação única e conjunta dos dois produtos geralmente melhorou as propriedades do solo e aumentou o rendimento e a qualidade do pepino. O pH do solo mostrou tendências de diminuição significativa no solo tratado com Biocarvão, Vermicomposto e Biocarvão+Vermicomposto com diferentes anos de cultivo contínuo, com aumentos médios de 1,24–2,46%, 0,73–1,18% e 0,34–0,44%, respectivamente. Os tratamentos com Biocarvão+Vermicomposto geralmente foram os melhores em diminuir a condutividade elétrica (CE) do solo, regular os nutrientes e aumentar o carbono orgânico dissolvido (DOC) e as quantidades de fungos e bactérias (Wang et al., 2021).

A modelagem de equações estruturais mostrou que o pH do solo, DOC, fósforo disponível, potássio total e as quantidades de fungos e bactérias contribuíram positivamente para a produtividade e qualidade dos frutos de pepino, enquanto a CE do solo teve um efeito negativo. Essas propriedades também interagiram entre si (por exemplo, houve fortes correlações entre CE do solo, pH, DOC, nutrientes e as quantidades de fungos e bactérias) e, portanto, afetaram indiretamente o rendimento e a qualidade do pepino. A aplicação conjunta de biocarvão e vermicomposto ($7,5 \text{ t.ha}^{-1} + 7,5 \text{ t.ha}^{-1}$) é, portanto, recomendada para aliviar os obstáculos de cultivo contínuo no cultivo em ambiente protegido (Wang et al., 2021).

Os resultados de Lima et al. (2016) com mudas de beterraba cultivar Tall Top Early Wonder, não foram satisfatórios, pois a adição de biocarvão ao Latossolo Vermelho sem fertilização não promoveu incremento no crescimento e na qualidade das mudas. Esperava-se nesse estudo que o biocarvão apresentasse função de fertilizante, já que se verificou altas concentrações de K na sua composição, porém não foi registrada estímulos no desenvolvimento das plantas, o que segundo os autores provavelmente é devido ao desbalanço nutricional promovido pelo suprimento inadequado dos outros elementos essenciais (Lima et al., 2016).

Para as culturas de milho e feijão cultivados em Neossolo Regolítico não foram verificadas diferenças significativas quanto aos componentes de produção (altura de plantas e diâmetro do caule) do milho e do feijão, sendo que as maiores produções de biomassa seca de milho foram encontradas nos tratamentos com adubação química e biocarvão de borra de café (nas doses de 12 e 16 Mg.ha^{-1}), enquanto para o feijão não houve diferença entre os tratamentos. O tratamento com biocarvão de borra de café (dose de 16 Mg.ha^{-1}) promoveu maior eficiência no uso de água, consumindo 45,6 e 47% menos água nas culturas do milho e feijão, respectivamente (Silva, 2016).

O material lodo de esgoto também foi testado para a produção de biocarvão, visando o aproveitamento agrícola do material. Em testes com rabanete (*Raphanus sativus* L.), a adição do biocarvão produzido a partir do lodo de esgoto a 300°C alteraram o desenvolvimento agrônômico da cultura, como número de folhas, altura da planta, comprimento da folha e massa seca da parte aérea. Os efeitos foram de acordo com o aumento da dose do produto, com as melhores respostas obtidas entre as doses 20 a 60 Mg.ha^{-1} , sendo observada uma leve redução a partir da dose 60 Mg.ha^{-1} , que segundo os autores pode ser em função de possíveis desbalanços nutricionais ou a elevada presença (19,4 g.Kg^{-1}) de ácido húmico no biocarvão (Sousa, 2015).

O biocarvão derivado da pirólise rápida de serragem de pinheiro melhorou o crescimento e o rendimento do sorgo em dois diferentes solos arenosos do deserto sob experimento em vaso. A maior produtividade de sorgo foi alcançada na taxa de aplicação de 22 t.ha^{-1} , enquanto diminuiu significativamente na taxa de aplicação mais alta (45 t.ha^{-1}) de biocarvão (Laghari et al., 2015).

A supressão do crescimento da cultura em maiores taxas de aplicação de biocarvão, segundo os autores se deve principalmente ao aumento da relação C/N do solo e à perda de alguns micronutrientes como Cu, Fe e Mn, e desse modo pode ser usado para melhorar a qualidade dos solos arenosos desérticos para o desenvolvimento sustentável (Laghari et al., 2015).

4. Considerações Finais

Observou-se a partir da revisão que o biocarvão tem características físico-químicas variáveis e inconsistentes, dependente da sua origem, temperatura de pirólise e composição mineral da biomassa original. Além disso, ficou evidente que os melhores resultados agrônômicos foram obtidos por meio de elevadas doses de biocarvão.

De modo geral, o biocarvão apresenta características importantes para solos desérticos ou com baixa precipitação, como os solos do Semiárido brasileiro, que em sua maioria apresentam problemas de compactação e salinização, uma vez que tem como efeitos a redução da densidade do solo, o aumento da porosidade do solo, e consequente aumento da retenção de água no solo e disponibilidade para as plantas. Além de promover um melhor fluxo de água no solo, favorecendo a lixiviação dos sais.

A partir da revisão foi possível observar que a relação C/N do solo é incrementada com o uso do biocarvão, o que contribui para a atividade microbológica do solo, promovendo alterações positivas. Também, demonstrou aumentar o pH do solo, favorecendo a disponibilização em solos ácidos, em detrimento da função de fertilizante.

Referências

- Ajeng, A. A., Abdullah, R., Ling, T. C., Ismail, S., Lau, B. F., Ong, M. H. C., Chew, K. W., Show, P. L., & Chang, J. (2020). Bioformulation of biochar as a potential inoculant carrier for sustainable agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101168.
- Brewer, C. E. (2012). *Biochar characterization and engineering* (Tese de doutorado). Iowa State University, Ames.
- Caldas, M. A. E. (1986). *Estudos de revisão de literatura: Fundamentação e estratégia metodológica*. Hucitec.
- Casarin, S. T., Porto, A. R., Gabatz, R. I. B., Bonow, C. A., Ribeiro, J. P., & Mota, M. S. (2020). Tipos de revisão de literatura: considerações das editoras do Journal of Nursing and Health. *Journal of Nursing and Health*. 10(5). <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/enfermagem/article/view/19924>.
- Chen, H., Zhang, J., Tang, L., Su, M., Tian, D., Zhang, L., Li, Z., & Hu, S. (2019). Enhanced Pb immobilization via the combination of biochar and phosphate solubilizing bacteria. *Environment International*, 127, 395–401.
- Di Blasi, C., Tanzi, V., & Lanzetta, M. (1997). A study on the production of agricultural residues in Italy. *Biomass and Bioenergy*, 12(5), 321–331.
- Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology* (p. 20). Earthscan.
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Songe, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536–554.
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., & Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51, 2061–2069.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88, 37–41.
- 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.
- Gray, M., Johnson, M. G., Dragila, M. I., & Kleber, M. (2014). Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass and Bioenergy*, 61, 196–205.
- Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., Ammara, U., Ok, Y. S., & Siddique, K. H. (2017). Biochar for crop production: Potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 685–716.
- Jeffery, S., Meinders, M. B. J., Stoof, C. R., Bezemer, T. M., van de Voorde, T. F. J., Mommer, L., & van Groenigen, J. W. (2015). Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, 251–252, 47–54.
- Jindo, K., Audette, Y., Higashikawa, F. S., Silva, C. A., Akashi, K., Mastrolonardo, G., Sánchez-Monedero, M. A., & Mondini, C. (2020). Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(15), 1–12.
- Kalinke, C. (2019). *Biochar quimicamente ativado: Obtenção, caracterização e aplicação no desenvolvimento de sensores eletroquímicos* (Tese de doutorado). Universidade Federal do Paraná.
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2016). Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. *Environment International*, 87, 1–12.
- Laghari, M., Mirjat, M. S., Hu, Z., Fazal, S., Xiao, B., Hu, M., Chen, Z., & Guo, D. (2015). Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena*, 135, 313–320.

- Laird, D. A., Rogovska, N., García-Pérez, M., Collins, H., Streubel, J., & Smith, M. (2011). Pyrolysis and biochar-opportunities for distributed production and soil quality enhancement. In K. Newell (Ed.), *Sustainable alternative fuel feedstock opportunities, challenges and roadmaps for six U.S. regions* (Chap. 16). USDA.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, *158*, 436–442.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Lima, S. L., Marimon-Junior, B. H., Tamiozzo, S., Petter, F. A., Marimon, B. S., & Abreu, M. F. (2016). Biochar adicionado em Latossolo Vermelho beneficia o desenvolvimento de mudas de beterraba? *Comunicata Scientiae*, *7*(1), 97–103.
- Mangrich, A. S., Maia, C. M. B. F., & Novotny, E. H. (2011). Biocarvão: As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. *Revista Ciência Hoje*, *47*, 48–52.
- Mia, S., Dijkstra, F. A., & Singh, B. (2017). Long-term aging of biochar: A molecular understanding with agricultural and environmental implications. In *Advances in Agronomy* (Vol. 141, pp. 1–51). Elsevier.
- Palansooriya, K. N., Wong, J. T. F., & Hashimoto, Y. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: A critical review. *Biochar*, *1*, 3–22.
- Parihk, S. J., Goynes, K. W., Margenot, A. J., Mukome, F. N. D., & Calderón, F. J. (2014). Soil chemical insights provided through vibrational spectroscopy. *Advances in Agronomy*, *126*, 1–148.
- Pariyar, P., Kumari, K., Jain, M. K., & Jadhao, P. S. (2020). Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Science of the Total Environment*, *713*, 136433.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free e-book]. Editora da UAB/NTE/UFSM.
- Rawat, J., Saxena, J., & Sanwal, P. (2019). Biochar: A sustainable approach for improving plant growth and soil properties. In V. Abrol & P. Sharma (Eds.), *Biochar - An imperative amendment for soil and the environment* (pp. 1–18). Intech Open.
- Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, *361*, 114055.
- Ronsse, F., Van Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology Bioenergy*, *5*, 104–115.
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paul. Enferm.* *20* (2). <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>
- Shaaban, A., Se, S., Dimin, M. F., Juoi, J. M., Haizal, M., Husin, M., Merry, N., & Mitan, M. (2014). Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *107*, 31–39.
- Silva, W. M. (2016). *Aplicação de biochar de resíduos de café em Neossolo Regolítico: Efeitos nas características químicas e biológicas e na produção de milho e feijão* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2009). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, *105*, 47–82.
- Song, S., Arora, S., Laserna, A. K., Shen, Y., Thian, B. W. Y., Cheong, J. C., ... Wang, C. (2020). Biochar for urban agriculture: Impacts on soil chemical characteristics and on *Brassica rapa* growth, nutrient content and metabolism over multiple growth cycles. *Science of the Total Environment*, *727*, 138742.
- Sousa, A. A. T. C. (2015). *Biochar de lodo de esgoto: Efeitos no solo e na planta no cultivo de rabanete* (Tese de doutorado). Universidade de Brasília.
- Sun, D., Meng, J., Liang, H., Yang, E., Huang, Y., Chen, W., Jiang, L., Lan, Y., Zhang, W., & Gao, J. (2015). Effect of volatile organic compounds absorbed to fresh biochar on survival of *Bacillus mucilaginosus* and structure of soil microbial communities. *Journal of Soils and Sediments*, *15*, 271–281.
- Tan, Y. L., Abdullah, A. Z., & Hameed, B. H. (2017). Fast pyrolysis of durian (*Durio zibethinus* L) shell in a drop-type fixed bed reactor: Pyrolysis behavior and product analyses. *Bioresource Technology*, *243*, 85–92.
- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2018). Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, *326*, 88–95.
- Wang, F., Wang, X., & Song, N. (2021). Biochar and vermicompost improve the soil properties and the yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in plastic shed soil continuously cropped for different years. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *315*, 107425.
- Wang, Y., Yin, R., & Liu, R. (2014). Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *110*, 375–381.
- 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.
- Yargicoglu, E. N., Yamini, B., Reddy, K. R., & Spokas, K. (2015). Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. *Waste Management*, *36*, 256–268.
- Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B., & Wu, C. (2019). Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of the Total Environment*, *659*, 473–490.
- Zhang, J., Lü, F., Zhang, H., Shao, L., Chen, D., & He, P. (2015). Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. *Scientific Reports*, *5*, 1–8