CAPÍTULO 2

BIOCHAR COMO INDUTOR DE SOLOS SUPRESSIVOS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963730.1-2

Moisés Silva de Mendonça Júnior, e-mail: moises.agro2025@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/6303760195972174
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Marcos Vinícius Cordeiro Conceição, e-mail: marcos.conceicao@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/0171271025018760
Maria Laiane da Silva, e-mail: maria.laiane@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5197880533423893
Reverson da Silva, e-mail: reverson.silva@arapiraca.ufal.br, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/8990903516954211
José Vitor da Silva Nunes, e-mail: vitor4899@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9593210495913688
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

As doenças causadas por fitopatógenos habitantes do solo representam importante limitação à produção agrícola, devido à persistência desses organismos no ambiente e à dificuldade de seu manejo. Nesse contexto, o biochar tem sido apontado como uma alternativa capaz de contribuir para a indução de solos supressivos por meio de modificações nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo. Este capítulo teve como objetivo analisar o potencial do biochar na supressão de doenças de plantas, considerando seus efeitos sobre os atributos edáficos, o microbioma rizosférico, os mecanismos de antagonismo aos fitopatógenos e a ativação das defesas vegetais. Para isso, foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, descritiva e analítica, com ênfase em estudos publicados entre 2010 e 2026. As evidências analisadas demonstram que a aplicação de biochar pode reduzir a densidade do solo, aumentar a porosidade e a retenção de água, modificar o pH e a capacidade de troca catiônica, além de favorecer a disponibilidade de nutrientes e proporcionar micro-hábitats para microrganismos benéficos. Essas alterações podem promover a reestruturação do microbioma, o recrutamento de grupos antagonistas, a competição por recursos e sítios de colonização, a produção de compostos antimicrobianos e a indução de respostas sistêmicas de defesa nas plantas. Estudos em diferentes patossistemas demonstram redução da severidade de doenças causadas por fungos, oomicetos e bactérias; entretanto, a resposta ao biochar apresenta elevada variabilidade e depende da matéria-prima, das condições de pirólise, da dose aplicada, das características do solo, da cultura e do agente etiológico. Conclui-se que o biochar apresenta potencial para contribuir para a formação de solos supressivos, mas sua utilização deve ser baseada na caracterização prévia do material e na validação em condições específicas de cultivo, sendo recomendado como componente complementar do manejo integrado de doenças de plantas.

PALAVRAS-CHAVE: biochar; solos supressivos; fitopatógenos; microbioma do solo; controle biológico; manejo integrado de doenças.

1. INTRODUÇÃO

As doenças causadas por fitopatógenos habitantes do solo constituem uma limitação persistente à produção agrícola, especialmente porque muitos desses organismos formam

estruturas de resistência, apresentam ampla gama de hospedeiros e sobrevivem por longos períodos no ambiente. O manejo dessas doenças é dificultado pela distribuição irregular dos patógenos no solo e pela influência simultânea da umidade, temperatura, fertilidade e atividade microbiana sobre o processo infeccioso (Weller *et al*., 2002).

Embora fungicidas, fumigantes e outros produtos químicos possam reduzir temporariamente o inóculo, sua eficiência nem sempre é estável, além de existirem preocupações relacionadas à seleção de populações resistentes, aos resíduos e aos impactos sobre organismos não alvo (De Corato, 2020). Nesse contexto, estratégias capazes de fortalecer os mecanismos naturais de regulação biológica vêm recebendo maior atenção, principalmente aquelas fundamentadas no manejo do microbioma e na melhoria da qualidade do solo (Berendsen *et al*., 2012). Entre essas estratégias, destaca-se a indução da supressividade, propriedade pela qual determinados solos limitam o estabelecimento do patógeno ou reduzem a intensidade da doença, mesmo na presença de hospedeiro suscetível e condições ambientais favoráveis (Schlatter *et al*., 2017).

A supressividade resulta da integração entre atributos físicos, químicos e biológicos do solo e pode ser classificada como geral ou específica. A supressividade geral está relacionada à atividade coletiva da comunidade microbiana, que restringe os patógenos por meio da competição por nutrientes, energia e espaços de colonização (Weller *et al*., 2002). A supressividade específica, por sua vez, decorre da ação de determinados microrganismos ou grupos funcionais capazes de produzir antibióticos, sideróforos, enzimas hidrolíticas e outros compostos antagonistas. Evidências metagenômicas demonstram que plantas submetidas ao ataque de patógenos podem favorecer o recrutamento de comunidades bacterianas protetoras, enriquecidas em genes envolvidos na síntese de metabólitos antimicrobianos (Mendes *et al*., 2011).

Além da composição taxonômica, a organização das redes de interação e a diversidade funcional do microbioma são determinantes para a estabilidade da supressão ao longo do tempo (Schlatter *et al*., 2017). Dessa maneira, o desenvolvimento de solos supressivos pode ser estimulado por práticas que melhorem as condições edáficas e favoreçam a permanência de microrganismos benéficos na rizosfera (De Corato, 2020).

O biochar apresenta-se como uma alternativa promissora para essa finalidade. Esse material carbonáceo é produzido pela conversão termoquímica de biomassa em ambiente com disponibilidade limitada de oxigênio e apresenta características que variam conforme a matéria-prima e as condições de pirólise. Sua estrutura porosa, elevada área superficial e presença de grupos funcionais permitem modificar a densidade, a agregação, a retenção de água e a

disponibilidade de nutrientes no solo (Blanco-Canqui, 2017). A incorporação do biochar também pode elevar o pH e a capacidade de troca catiônica, particularmente em solos tropicais ácidos, além de reduzir determinadas perdas de nutrientes por lixiviação (Dai *et al*., 2020). Seus poros e superfícies funcionam como micro-hábitats para bactérias e fungos, protegendo-os contra dessecação, predação e oscilações ambientais (Lehmann *et al*., 2011). Entretanto, essas propriedades não são uniformes, pois dependem da origem da biomassa, da temperatura de produção, do tamanho das partículas, do envelhecimento do material e das características do solo receptor (Dai *et al*., 2021).

Além dos efeitos sobre a qualidade do solo e o crescimento vegetal, o biochar pode interferir diretamente nas relações entre hospedeiro, patógeno e microbioma. Sua aplicação tem sido associada à reestruturação das comunidades microbianas, ao aumento de populações antagonistas, à modificação dos exsudatos radiculares e à indução de respostas sistêmicas de defesa nas plantas (Elad *et al*., 2010). Em diferentes patossistemas, esses mecanismos contribuíram para reduzir doenças causadas por *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Ralstonia solanacearum*, *Botrytis cinerea* e outros agentes fitopatogênicos (Jaiswal *et al*., 2017).

Uma avaliação quantitativa global indicou redução média de 47,46% na severidade das doenças após a aplicação de biochar, acompanhada por incremento médio de 44,05% na biomassa vegetal (Yang *et al*., 2022). Esses resultados evidenciam que o material pode atuar não apenas como condicionador físico-químico, mas também como modulador das interações biológicas responsáveis pela sanidade do solo e das plantas (Poveda *et al*., 2021).

Apesar do potencial demonstrado, os efeitos fitossanitários do biochar permanecem inconsistentes entre estudos. Enquanto determinados materiais reduzem a incidência e a severidade das doenças, outros apresentam efeito neutro ou podem favorecer o desenvolvimento do patógeno (Bonanomi *et al*., 2015). Essa variabilidade está relacionada à composição do biochar, à temperatura de pirólise, à dose aplicada, ao tipo de solo, à espécie vegetal e à estratégia de infecção do agente etiológico (Frenkel *et al*., 2017).

Além disso, grande parte das evidências foi obtida em condições controladas, dificultando a extrapolação dos resultados para sistemas agrícolas submetidos às variações ambientais e à complexidade das comunidades microbianas nativas (Liu *et al*., 2023). A ausência de critérios padronizados para caracterização e aplicação também limita a definição de recomendações agronômicas seguras e reproduzíveis (Iacomino *et al*., 2022).

Diante disso, torna-se necessário compreender de forma integrada como as modificações físico-químicas e biológicas promovidas pelo biochar podem contribuir para a

construção de solos supressivos. Assim, este artigo tem como objetivo analisar o potencial do biochar como indutor da supressividade a doenças de plantas, abordando seus efeitos sobre os atributos do solo, a reestruturação do microbioma, os mecanismos de antagonismo aos fitopatógenos e a ativação das defesas vegetais. Também são discutidas as evidências disponíveis em diferentes patossistemas, as limitações responsáveis pela variabilidade dos resultados e as perspectivas para o uso do biochar como componente complementar do manejo integrado de doenças.

2. METODOLOGIA

O presente capítulo de livro caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o propósito de reunir, interpretar e integrar evidências científicas sobre o potencial do biochar na indução de solos supressivos a doenças de plantas. A revisão concentrou-se nas modificações físico-químicas e biológicas promovidas pelo material, em seus efeitos sobre o microbioma do solo e da rizosfera e nos mecanismos envolvidos na redução da sobrevivência, colonização e atividade de fitopatógenos.

A pesquisa foi orientada pela seguinte questão: de que maneira a aplicação de biochar pode modificar as propriedades do solo, reorganizar as comunidades microbianas e contribuir para a supressão de doenças de plantas? Para responder a essa questão, foram consultadas publicações científicas e técnico-científicas relacionadas à supressividade do solo, à produção e caracterização do biochar, às interações entre solo, planta e microrganismos, ao controle de fitopatógenos habitantes do solo, à indução de resistência vegetal e ao manejo integrado de doenças.

As buscas bibliográficas abrangeram estudos publicados principalmente entre 2010 e 2026, sem excluir referências clássicas consideradas indispensáveis à fundamentação dos conceitos de solos supressivos, microbioma rizosférico, antagonismo microbiano e sanidade vegetal. A estratégia de busca empregou descritores em português e inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, incluindo os termos *biochar*, *disease-suppressive soil*, *soil suppressiveness*, *plant disease suppression*, *soilborne pathogens*, *soil microbiome*, *rhizosphere microbiome*, *biological control*, *induced systemic resistance*, *plant pathogens*, *soil physicochemical properties* e *integrated disease management*, além de suas correspondências em português.

Foram priorizados artigos científicos originais, revisões, meta-análises, capítulos de livros e documentos técnico-científicos que apresentassem relação direta com os efeitos do biochar sobre a ocorrência ou a severidade de doenças de plantas. Também foram considerados estudos que avaliassem alterações no pH, na porosidade, na densidade, na retenção de água, na capacidade de troca catiônica e na disponibilidade de nutrientes, desde que essas modificações fossem relacionadas à atividade microbiana, à sanidade do solo ou às interações entre plantas e fitopatógenos. Foram incluídas pesquisas sobre mudanças na composição e na diversidade do microbioma, recrutamento de microrganismos antagonistas, modificação dos exsudatos radiculares, indução de resistência e utilização do biochar como suporte para agentes de controle biológico.

Foram excluídas publicações sem relação direta com a questão orientadora, estudos voltados exclusivamente ao sequestro de carbono, à remediação ambiental ou à produtividade vegetal sem avaliação microbiológica ou fitossanitária, bem como trabalhos que não apresentassem informações suficientes sobre o tipo de biochar, a dose aplicada, o solo, a cultura ou o patógeno investigado. Estudos duplicados, documentos sem acesso às informações essenciais e publicações cuja abordagem não permitisse interpretar os efeitos do biochar sobre a supressividade também não foram considerados na síntese.

Após a identificação das publicações, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para verificar sua adequação aos objetivos do artigo. Os trabalhos potencialmente relevantes foram examinados integralmente, considerando-se a clareza metodológica, a pertinência temática e a contribuição para a compreensão dos mecanismos de supressão. Por se tratar de uma revisão narrativa, a seleção das fontes não teve como finalidade produzir uma estimativa quantitativa combinada dos efeitos, mas construir uma síntese crítica dos mecanismos, das evidências experimentais e dos fatores responsáveis pela variabilidade das respostas observadas em diferentes patossistemas.

As informações extraídas dos estudos foram organizadas considerando autor e ano de publicação, matéria-prima empregada na produção do biochar, temperatura e condições de pirólise, dose aplicada, características do solo, espécie vegetal, agente causal, condições experimentais e efeito sobre a incidência ou a severidade da doença. Quando disponíveis, também foram examinadas informações sobre alterações físico-químicas do solo, composição do microbioma, abundância do patógeno, recrutamento de microrganismos benéficos, expressão de genes de defesa e desempenho agronômico das plantas.

A comparação entre os trabalhos buscou identificar resultados convergentes, divergências e respostas dependentes do contexto, reconhecendo que os efeitos observados em

determinada combinação entre biochar, solo, planta, microbioma e patógeno não podem ser automaticamente extrapolados para outros sistemas produtivos. Também foram analisadas possíveis respostas neutras ou desfavoráveis, especialmente aquelas relacionadas a doses excessivas, materiais com elevada salinidade ou alcalinidade, presença de compostos fitotóxicos e alterações ambientais capazes de favorecer o desenvolvimento do patógeno.

A síntese das evidências foi estruturada em quatro eixos temáticos: solos supressivos e o papel do biochar na sanidade vegetal; modificações físico-químicas do solo promovidas pelo biochar; reestruturação do microbioma e mecanismos biológicos de supressão; e evidências de supressão de doenças, limitações e perspectivas de aplicação. Essa organização permitiu integrar conhecimentos de fitopatologia, microbiologia e ciência do solo, proporcionando uma compreensão abrangente do potencial do biochar como componente complementar do manejo integrado de doenças de plantas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Solos supressivos e o papel do biochar na sanidade vegetal

Solos supressivos são aqueles nos quais a ocorrência ou a severidade de determinada doença permanece reduzida, mesmo na presença de patógeno virulento, hospedeiro suscetível e condições ambientais favoráveis. Essa propriedade resulta da interação entre fatores físicos, químicos e biológicos, podendo apresentar caráter geral, relacionado à atividade global da microbiota, ou específico, associado à ação de determinados grupos antagonistas (Weller *et al*., 2002).

Estudos metagenômicos demonstram que a supressividade pode decorrer do enriquecimento de bactérias produtoras de compostos antimicrobianos e competidoras por nutrientes e sítios de colonização (Mendes *et al*., 2011). Além da composição microbiana, a diversidade funcional e as redes de interação entre os microrganismos determinam a estabilidade desse processo (Schlatter *et al*., 2017). Assim, práticas que reorganizam o microbioma e melhoram as condições edáficas podem contribuir para transformar solos condutivos em ambientes menos favoráveis às doenças (De Corato, 2020).

Nesse contexto, o biochar apresenta potencial para participar da construção da supressividade por modificar simultaneamente diferentes componentes do solo. Sua estrutura porosa e elevada área superficial oferecem microssítios para a colonização microbiana, além de favorecerem a retenção de água, nutrientes e compostos orgânicos (Lehmann *et al*., 2011). Esses poros podem proteger microrganismos benéficos contra oscilações de umidade, temperatura e disponibilidade de substratos, aumentando sua permanência na rizosfera

(Quilliam *et al*., 2013). O biochar também modifica o pH, a capacidade de troca de cátions e a disponibilidade de nutrientes, alterando as interações entre planta, microbiota e patógeno (Graber *et al*., 2014). Entretanto, a intensidade dessas respostas depende da matéria-prima, da temperatura de pirólise, da porosidade, do conteúdo de carbono lábil e das propriedades eletroquímicas do material (Dai *et al*., 2021).

A reestruturação do microbioma rizosférico constitui um dos principais mecanismos relacionados à supressão de doenças pelo biochar. Em pepino, diferentes materiais carbonizados reduziram o tombamento causado por *Rhizoctonia solani*, embora a resposta tenha variado conforme a matéria-prima, a temperatura de produção e a concentração aplicada (Jaiswal *et al*., 2014). Em tomateiro, a incorporação de biochar suprimiu a podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, reduziu a colonização radicular e modificou a comunidade bacteriana da rizosfera (Jaiswal *et al*., 2017).

O aumento da biomassa microbiana associado à redução da murcha de Fusarium, mesmo sem forte inibição do crescimento micelial, reforça a importância dos mecanismos indiretos de controle (Silva *et al*., 2020). Além disso, raízes de tomateiro cultivadas com biochar recrutaram bactérias promotoras de crescimento e antagonistas, incluindo representantes de *Pseudomonas*, ampliando a capacidade supressiva do microbioma rizosférico (Jin *et al*., 2022).

Outros mecanismos incluem a adsorção de compostos produzidos pelos patógenos, a alteração dos exsudatos radiculares e a ativação das defesas vegetais. A aplicação de biochar produzido de madeira de citros induziu resistência sistêmica em tomateiro e pimentão contra *Botrytis cinerea* e *Leveillula taurica*, demonstrando que alterações no solo podem reduzir doenças da parte aérea (Elad *et al*., 2010). Em morangueiro, a redução da podridão-cinzenta esteve associada a mudanças na expressão de genes relacionados às vias do ácido salicílico, ácido jasmônico e etileno (Meller Harel *et al*., 2012).

Em solos infestados por *Ralstonia solanacearum*, o biochar de palha de trigo reduziu a murcha bacteriana do tomateiro, melhorou atributos químicos do solo e favoreceu grupos bacterianos associados à sanidade da rizosfera (Gao *et al*., 2019). Em tabaco, o biochar de casca de arroz também diminuiu a abundância do patógeno e alterou a composição da comunidade bacteriana, contribuindo para a supressão da doença (Chen *et al*., 2020).

Apesar desses resultados, o biochar não deve ser considerado universalmente supressivo. Uma análise de diferentes patossistemas identificou predominância de respostas positivas, mas também situações em que o material apresentou efeito neutro ou aumentou a severidade das doenças (Bonanomi *et al*., 2015). Essa variação pode estar relacionada à dose, pois concentrações reduzidas podem estimular microrganismos antagonistas e respostas de

defesa, enquanto quantidades elevadas podem provocar desequilíbrios nutricionais, fitotoxicidade ou condições favoráveis ao patógeno (Frenkel *et al*., 2017). Portanto, sua utilização deve considerar as características do produto, do solo, da cultura e do agente etiológico envolvido (Poveda *et al*., 2021). Embora uma meta-análise tenha indicado redução média de 47,46% na severidade das doenças, a eficiência variou conforme a matéria-prima, a temperatura de pirólise, a dose e o patossistema avaliado (Yang *et al*., 2022). Assim, o biochar deve ser integrado a outras práticas de manejo e validado em condições de campo para que sua contribuição à supressividade e à sanidade vegetal seja estável e previsível.

3.2 Modificações físico-químicas do solo promovidas pelo biochar

A incorporação de biochar modifica a estrutura física do solo em razão de sua baixa densidade, elevada porosidade e grande superfície específica. Sua mistura com a matriz mineral tende a reduzir a densidade aparente e a resistência à penetração, favorecendo a aeração e o desenvolvimento radicular, sobretudo em solos compactados ou de textura arenosa (Blanco-Canqui, 2017). Em uma meta-análise, Omondi *et al.* (2016) observaram redução média de 7,6% na densidade do solo, acompanhada por aumentos de 8,4% na porosidade total e de 8,2% na estabilidade dos agregados. A reorganização do espaço poroso também altera a infiltração, a condutividade hidráulica e a distribuição da água entre macro e microporos.

De acordo com Razzaghi *et al.* (2020), o biochar reduziu, em média, 9% da densidade aparente e aumentou a água disponível principalmente em solos de textura grossa, nos quais sua estrutura porosa exerce maior influência. Em solos argilosos, também podem ocorrer maior coesão entre partículas, resistência à desagregação e retenção de água, embora a intensidade desses efeitos dependa da matéria-prima e do tamanho das partículas do material aplicado (Sun; Lu, 2014).

As alterações químicas estão relacionadas à composição mineral, à alcalinidade e aos grupos funcionais presentes na superfície do biochar. Materiais ricos em cinzas e cátions básicos podem elevar o pH e reduzir a acidez trocável, efeito particularmente relevante em solos tropicais ácidos. Singh *et al.* (2022) verificaram, por meio de meta-análise, aumentos médios de 46% no pH, 20% na capacidade de troca catiônica e 27% no carbono orgânico após a aplicação de biochar. Essa elevação do pH decorre tanto do aporte de carbonatos, óxidos e bases quanto do consumo de prótons durante as reações entre o material e o solo. Entretanto, Sun *et al.* (2022) demonstraram que a magnitude das modificações depende principalmente da dose aplicada, do pH inicial e do teor de areia do solo. A elevada superfície específica e o

desenvolvimento de cargas negativas favorecem a adsorção de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e NH_4^{+}, ampliando a capacidade de retenção de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação (Dai *et al.*, 2020). Em solos altamente intemperizados, biochars alcalinos e com elevada capacidade de troca catiônica podem complementar a baixa atividade das argilas, contribuindo para maior disponibilidade e eficiência de utilização dos nutrientes (Domingues *et al.*, 2020).

Os efeitos físico-químicos do biochar, contudo, não são estáticos nem uniformes. Após sua incorporação, o material passa por fragmentação, oxidação e interação com minerais, matéria orgânica dissolvida e microrganismos, processos que alteram sua porosidade, polaridade e reatividade superficial ao longo do tempo (Wang *et al.*, 2020). A oxidação introduz grupos carboxílicos e fenólicos, elevando a densidade de cargas negativas e, consequentemente, a capacidade de troca catiônica do material envelhecido (Mia *et al.*, 2017).

Esse comportamento pode aumentar a retenção de nutrientes; entretanto, a resposta varia conforme a matéria-prima, a temperatura de pirólise, a dose e as propriedades iniciais do solo. Laird *et al.* (2010) constataram redução da lixiviação de nutrientes em solo agrícola tratado com biochar, mas destacaram que a retenção de ânions e cátions não ocorre com a mesma intensidade. Resultados semelhantes foram observados por Dissanayake *et al.* (2023), que identificaram respostas distintas entre solos quanto à retenção de macronutrientes. Portanto, o biochar deve ser caracterizado previamente e sua aplicação ajustada às condições edáficas, pois doses excessivas ou materiais muito alcalinos podem aumentar a condutividade elétrica, provocar desequilíbrios nutricionais ou diminuir a disponibilidade de determinados elementos.

3.3 Reestruturação do microbioma e mecanismos biológicos de supressão

A incorporação do biochar ao solo pode reestruturar o microbioma rizosférico ao modificar simultaneamente a disponibilidade de nutrientes, o pH, a retenção de água e a oferta de micro-hábitats para colonização microbiana. Sua estrutura porosa fornece superfícies protegidas contra dessecação e predação, enquanto os grupos funcionais presentes nas partículas favorecem a retenção de compostos orgânicos utilizados como substratos metabólicos pelos microrganismos (Lehmann *et al*., 2011). Em tomateiro, alterações na composição, diversidade funcional e atividade da comunidade microbiana estiveram associadas à redução da podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (Jaiswal *et al*., 2017).

A aplicação de biochar de palha de trigo também aumentou a diversidade bacteriana e favoreceu grupos pertencentes a Firmicutes, demonstrando que a reorganização da microbiota depende das características do material aplicado e do compartimento edáfico analisado (Yan *et*

al., 2022). Em solos submetidos ao cultivo contínuo, verificou-se que a comunidade bacteriana respondeu mais intensamente à aplicação do biochar do que a comunidade fúngica, indicando que diferentes grupos taxonômicos apresentam sensibilidades distintas às alterações ambientais promovidas pelo condicionador (Wang *et al*., 2020).

A supressão biológica decorrente dessa reestruturação não depende apenas do aumento geral da diversidade, mas sobretudo do recrutamento de microrganismos com funções antagônicas. Em tomateiro, o biochar modificou a composição dos exsudatos radiculares e intensificou sua atividade quimiotática, permitindo que as raízes recrutassem uma comunidade bacteriana supressiva enriquecida em táxons relacionados a *Pseudomonas* (Jin *et al*., 2022).

Posteriormente, doses de 1 e 2% reduziram a severidade da murcha de Fusarium e a abundância de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, ao mesmo tempo que elevaram a ocorrência de microrganismos potencialmente benéficos na rizosfera (Jin *et al*., 2023). Em algodoeiro, o biochar diminuiu a colonização e a sobrevivência de *F. oxysporum* f. sp. *vasinfectum* e aumentou as populações de *Pseudomonas*, actinomicetos e *Trichoderma*, grupos reconhecidos por sua capacidade de restringir fitopatógenos (Asif *et al*., 2023). Resultados obtidos em condições de campo com ginseng também indicaram que a redução de doenças radiculares esteve mais relacionada à manipulação da microbiota e à ativação das defesas vegetais do que ao simples aumento da fertilidade do solo (Liu *et al*., 2022).

Os microrganismos favorecidos pelo biochar podem atuar por competição por carbono, nitrogênio, ferro e sítios de colonização, limitando os recursos necessários à germinação e ao estabelecimento dos patógenos. Além disso, bactérias e fungos antagonistas produzem sideróforos, antibióticos, compostos orgânicos voláteis e enzimas hidrolíticas capazes de inibir estruturas infectivas ou degradar componentes da parede celular dos fitopatógenos. A redução de doenças foliares em plantas cultivadas em substratos contendo biochar demonstrou que seus efeitos não se restringem ao contato direto com o patógeno, envolvendo também respostas sistêmicas mediadas pela interação solo–raiz–microbioma (Elad *et al*., 2010). Em morangueiro, a aplicação do condicionador alterou a expressão de genes relacionados à defesa e reduziu doenças provocadas por patógenos com diferentes estratégias de infecção (Meller Harel *et al*., 2012).

Em tomateiro, análises transcriptômicas confirmaram o envolvimento das rotas hormonais do ácido jasmônico e do ácido salicílico na resistência sistêmica ao *Fusarium* induzida pelo biochar (Jaiswal *et al*., 2020). Em morangueiro, a maior resistência dos frutos a *Botrytis cinerea* também esteve associada a mudanças específicas no microbioma rizosférico,

embora o mesmo efeito não tenha sido observado nas folhas, evidenciando a especificidade da resposta entre órgãos vegetais (De Tender *et al*., 2021).

O biochar ainda pode favorecer associações mutualísticas e aumentar a eficiência de agentes de controle biológico introduzidos no solo. Em áreas de replantio de aspargo, sua aplicação intensificou associações micorrízicas e reduziu a podridão da coroa e das raízes provocada por *Fusarium*, sugerindo que a melhoria das relações entre raízes e fungos simbiontes contribui para a proteção vegetal (Elmer; Pignatello, 2011). Entretanto, a resposta depende da matéria-prima utilizada na produção do biochar, uma vez que materiais distintos modificaram de forma diferenciada a micorrização, os exsudatos radiculares e o crescimento micelial de *F. oxysporum* em tomateiro (Akhter *et al*., 2015).

A aplicação combinada de biochar, composto orgânico e rizobactérias promotoras de crescimento também reduziu doenças e melhorou o desenvolvimento das plantas, demonstrando que o material pode funcionar como suporte para o estabelecimento de microrganismos benéficos (Rasool *et al*., 2021). Em cana-de-açúcar, a aplicação conjunta de biochar e corretivo modulou o microbioma rizosférico, reduziu a ocorrência de grupos patogênicos e favoreceu funções microbianas relacionadas à resistência da planta (Ahmad *et al*., 2025). De modo geral, as evidências demonstram que os efeitos do biochar sobre a supressividade estão associados à reestruturação da microbiota, ao favorecimento de microrganismos benéficos e à ativação de mecanismos de defesa das plantas. Os principais resultados experimentais que relacionam a aplicação de biochar às alterações no microbioma e à supressão de fitopatógenos estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Efeitos do biochar sobre o microbioma, a supressividade e a resposta de plantas a fitopatógenos

Cultura/sistema	**Efeito do biochar sobre microbiota/planta**	**Efeito fitossanitário ou mecanismo associado**	**Referência**
Tomateiro	Alteração da composição, diversidade funcional e atividade da comunidade microbiana	Redução da podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*	Jaiswal *et al.* (2017)
Solo com biochar de palha de trigo	Aumento da diversidade bacteriana e favorecimento de grupos de Firmicutes	Reestruturação da comunidade bacteriana em função das características do biochar e do compartimento edáfico	Yan *et al.* (2022)

Solo sob cultivo contínuo	Comunidade bacteriana apresentou resposta mais intensa que a comunidade fúngica	Evidência de respostas diferenciadas dos grupos microbianos às alterações promovidas pelo biochar	Wang *et al.* (2020)
Tomateiro	Modificação dos exsudatos radiculares e recrutamento de comunidade bacteriana enriquecida em táxons relacionados a *Pseudomonas*	Formação de microbiota rizosférica com características supressivas	Jin *et al.* (2022)
Tomateiro	Doses de 1 e 2% aumentaram microrganismos potencialmente benéficos na rizosfera	Redução da severidade da murcha de Fusarium e da abundância de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*	Jin *et al.* (2023)
Algodoeiro	Aumento de *Pseudomonas*, actinomicetos e *Trichoderma*	Redução da colonização e sobrevivência de *F. oxysporum* f. sp. *vasinfectum*	Asif *et al.* (2023)
Ginseng	Manipulação da microbiota associada à ativação das defesas vegetais	Redução de doenças radiculares, com efeito relacionado à microbiota e às defesas, e não apenas à fertilidade	Liu *et al.* (2022)
Morangueiro	Alterações na expressão de genes relacionados à defesa	Redução de doenças provocadas por patógenos com diferentes estratégias de infecção	Meller Harel *et al.* (2012)
Tomateiro	Ativação de respostas envolvendo as rotas do ácido jasmônico e ácido salicílico	Resistência sistêmica ao *Fusarium* induzida pelo biochar	Jaiswal *et al.* (2020)
Morangueiro	Alterações específicas no microbioma rizosférico	Maior resistência dos frutos a *Botrytis cinerea*, sem resposta equivalente nas folhas	De Tender *et al.* (2021)
Aspargo	Intensificação das associações micorrízicas	Redução da podridão da coroa e das raízes causada por *Fusarium*	Elmer; Pignatello (2011)
Tomateiro	Diferentes matérias-primas modificaram a micorrização, os exsudatos radiculares e o crescimento micelial do patógeno	Evidência de que a resposta depende das características do biochar utilizado	Akhter *et al.* (2015)
Biochar + composto + rizobactérias	Favorecimento do estabelecimento e da atuação de microrganismos benéficos	Redução de doenças e melhoria do desenvolvimento vegetal	Rasool *et al.* (2021)

Cana-de-açúcar	Modulação do microbioma rizosférico, redução de grupos patogênicos e favorecimento de funções associadas à resistência	Potencialização da proteção vegetal pela aplicação conjunta de biochar e corretivo	Ahmad *et al.* (2025)
Diferentes patossistemas	Resposta dependente da dose; concentrações reduzidas frequentemente apresentaram maior efeito supressivo	Doses elevadas podem apresentar ausência de efeito ou aumento da suscetibilidade	Frenkel *et al.* (2017)
Meta-análise/diferentes sistemas	Resposta variável conforme matéria-prima, solo e sistema de cultivo	Redução média de 47,46% na severidade das doenças	Yang *et al.* (2022)
Diferentes patógenos	Respostas distintas entre fungos, bactérias, oomicetos, vírus e nematoides	Grau de supressão dependente do grupo de fitopatógeno	Iacomino *et al.* (2022)
Feijão-fava sob cultivo contínuo	Biochar a 1% aumentou *Bacillus* e *Sphingomonas*, reduziu *Fusarium commune* e estimulou proteínas relacionadas à patogênese	A dose de 1% apresentou maior eficiência na indução da supressividade	Zhang *et al.* (2026)

Fonte: Autores, 2026

Apesar desses resultados, a formação de um microbioma supressivo não constitui uma resposta universal, pois depende da dose, da biomassa de origem, da temperatura de pirólise, do tipo de solo, da cultura e do patógeno envolvido. Concentrações reduzidas de biochar frequentemente diminuem a severidade das doenças, enquanto doses elevadas podem não apresentar efeito ou até aumentar a suscetibilidade, caracterizando respostas não lineares (Frenkel *et al*., 2017). Em avaliação quantitativa global, a aplicação do material reduziu, em média, 47,46% da severidade das doenças, mas a magnitude da resposta variou amplamente entre matérias-primas, condições edáficas e sistemas de cultivo (Yang *et al*., 2022).

A variabilidade também é demonstrada pelo fato de diferentes grupos de fungos, bactérias, oomicetos, vírus e nematoides apresentarem níveis distintos de supressão após a aplicação do condicionador (Iacomino *et al*., 2022). Em feijão-fava cultivado continuamente, a dose de 1% mostrou-se mais eficiente, aumentando as abundâncias de *Bacillus* e *Sphingomonas*, reduzindo *Fusarium commune* e estimulando a expressão de proteínas relacionadas à patogênese nas raízes (Zhang *et al*., 2026). Portanto, a capacidade do biochar de induzir solos supressivos resulta da integração entre mudanças ambientais, reorganização das redes microbianas, antagonismo ao patógeno e ativação das defesas vegetais, sendo necessária a adequação do material e da dose a cada patossistema.

3.4 Evidências de supressão de doenças, limitações e perspectivas de aplicação

As evidências disponíveis demonstram que o biochar pode reduzir a severidade de diferentes doenças de plantas, embora a magnitude da resposta depende das características do produto e do patossistema. Em uma meta-análise global, Yang *et al.* (2022) verificaram redução média de 47,46% na severidade das doenças e aumento de 44,05% na biomassa vegetal, com maior eficiência para biochars produzidos entre 350 e 600 °C e aplicados em concentrações de 3 a 5%. Em tomateiro e pimentão, a incorporação de biochar ao substrato reduziu o mofo-cinzento causado por *Botrytis cinerea* e o oídio provocado por *Leveillula taurica*, mesmo sem contato direto entre o material e os patógenos foliares, indicando a ativação de respostas sistêmicas de defesa (Elad *et al.*, 2010).

Resultados semelhantes foram encontrados em morangueiros, no qual doses de 1 e 3% diminuíram doenças causadas por patógenos com diferentes estratégias de infecção e alteraram a expressão de genes relacionados às vias de defesa vegetal (Meller Harel *et al.*, 2012). Em espécies florestais, a aplicação de biochar também reduziu o desenvolvimento de lesões provocadas por *Phytophthora cinnamomi* e *P. cactorum*, demonstrando que seu potencial não se limita às culturas anuais e hortícolas (Zwart; Kim, 2012). Em conjunto, esses resultados mostram que a supressão pode envolver simultaneamente modificações no ambiente edáfico, fortalecimento fisiológico do hospedeiro e indução de resistência sistêmica.

A ação supressiva é particularmente relevante contra patógenos habitantes do solo. Em Tomateiro, a incorporação de biochar reduziu a murcha bacteriana por meio da alteração das propriedades químicas do solo, do aumento da diversidade bacteriana e da diminuição da abundância de *Ralstonia solanacearum* (Chen *et al.*, 2020). Alterações na disponibilidade de nutrientes, no conteúdo de carbono orgânico e na estrutura da comunidade microbiana também foram associadas à redução da murcha bacteriana e à melhoria do crescimento das plantas (Gao *et al.*, 2019). No patossistema tomateiro–*Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, o biochar aumentou a diversidade taxonômica e funcional do microbioma rizosférico, favorecendo grupos capazes de competir por recursos e restringir o estabelecimento do patógeno (Jaiswal *et al.*, 2017).

Mais recentemente, doses de 1 e 2% reduziram a severidade da murcha de Fusarium e a abundância de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, enquanto estimularam microrganismos potencialmente benéficos, incluindo representantes de *Pseudomonas* (Jin *et al.*, 2023). Portanto, o efeito do biochar não deve ser interpretado apenas como toxicidade direta ao patógeno, mas

como consequência da reorganização das interações entre solo, microbiota, hospedeiro e agente causal.

Apesar dos resultados promissores, a aplicação do biochar não produz supressão de maneira universal. Biochar de casca de bordo produzido a 700 °C aumentou progressivamente o tombamento causado por *Rhizoctonia solani* em 11 espécies vegetais, possivelmente porque determinados compostos orgânicos presentes no material estimularam o crescimento e o metabolismo do fungo (Copley *et al.*, 2015). Em soja, o mesmo tipo de biochar modificou a expressão gênica da planta e de *R. solani*, aumentando a severidade da queima foliar e demonstrando que alterações fisiológicas induzidas pelo material podem favorecer o patógeno em determinadas combinações (Copley *et al.*, 2017).

Ao examinarem diferentes sistemas solo–planta–patógeno, De Medeiros *et al.* (2021) observaram que aproximadamente 70% dos estudos apresentaram respostas supressivas, enquanto os demais registraram efeitos dependentes da matéria-prima, ausência de controle ou aumento da doença. Outra limitação é que os resultados obtidos em laboratório e casa de vegetação nem sempre se reproduzem no campo, onde textura, matéria orgânica, umidade, fertilização, clima e microbiota nativa aumentam a variabilidade das respostas (Liu *et al.*, 2023). Doses excessivas também podem elevar o pH e a salinidade, causar desequilíbrios nutricionais, introduzir compostos potencialmente tóxicos ou disponibilizar nichos e fontes de carbono favoráveis aos próprios patógenos. Consequentemente, a indicação agronômica do biochar exige sua caracterização prévia e validação específica para cada condição edafoclimática e fitossanitária.

As perspectivas de aplicação dependem da substituição de recomendações generalizadas por biochars projetados para finalidades fitossanitárias específicas. A seleção da matéria-prima e das condições de pirólise pode direcionar atributos como porosidade, pH, composição mineral e presença de compostos orgânicos bioativos, aumentando a previsibilidade da supressão (Bonanomi *et al.*, 2015). Abordagens transcriptômicas mostraram que o biochar pode modular genes associados às vias do ácido salicílico, ácido jasmônico e etileno, oferecendo marcadores para identificar materiais capazes de induzir resistência sem comprometer o crescimento vegetal (Jaiswal *et al.*, 2020).

Outra possibilidade é utilizar o biochar como veículo para microrganismos antagonistas, uma vez que sua estrutura porosa pode favorecer a colonização e a persistência de bactérias promotoras do crescimento e agentes de controle biológico na rizosfera (Jin *et al.*, 2022). O emprego de metagenômica, metatranscriptômica e metabolômica deverá permitir a identificação das funções microbianas e dos metabólitos diretamente relacionados à

supressividade, superando análises baseadas somente na abundância taxonômica (Bhatt *et al.*, 2024). Para viabilizar a adoção em escala comercial, contudo, ainda são necessários experimentos de longa duração e em diferentes solos, definição de doses economicamente viáveis, avaliação de possíveis contaminantes e estabelecimento de padrões de qualidade. Assim, o biochar deve ser considerado um componente complementar do manejo integrado, associado a cultivares resistentes, controle biológico, rotação de culturas e práticas que conservem a diversidade microbiana do solo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biochar apresenta potencial para contribuir com a formação de solos supressivos ao melhorar atributos físico-químicos, favorecer microrganismos antagonistas e estimular mecanismos de defesa das plantas. Entretanto, sua eficiência varia conforme a matéria-prima, as condições de pirólise, a dose aplicada, o tipo de solo, a cultura e o fitopatógeno.

Assim, o biochar não deve ser considerado uma solução isolada ou universal, mas um componente complementar do manejo integrado de doenças. Sua aplicação exige caracterização prévia do material e validação em condições de campo. Estudos de longa duração ainda são necessários para definir doses seguras, padronizar produtos e aumentar a previsibilidade dos efeitos fitossanitários.

REFERÊNCIAS

AHMAD, S. et al. Synergistic application of biochar and lime modulates rhizosphere microbiome, suppresses pathogens, and enhances disease resistance in sugarcane. BMC Microbiology, v. 25, e622, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s12866-025-04355-z.

AKHTER, A. et al. Compost and biochar alter mycorrhization, tomato root exudation, and development of Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici. Frontiers in Plant Science, v. 6, e529, 2015. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00529.

ASIF, M.; HAIDER, M. S.; AKHTER, A. Impact of biochar on Fusarium wilt of cotton and the dynamics of soil microbial community. Sustainability, v. 15, n. 17, e12936, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su151712936.

BHATT, B. et al. A comprehensive review on biochar against plant pathogens: production, mechanisms and applications. Journal of Pure and Applied Microbiology, v. 18, n. 1, p. 1–20, 2024. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11419905/. Acesso em: 9 set. 2026.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, v. 81, n. 4, p. 687–711, 2017. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017.

BONANOMI, G.; IAGOPO, F.; SCALA, F. A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. Journal of Plant Pathology, v. 97, n. 2, p. 223–234, 2015.

BONANOMI, G. et al. Biochar chemistry and physical properties determine the phytotoxicity and potential for plant disease suppression. Phytopathology, v. 105, n. 5, p. 606–616, 2015.

CHEN, S.; QI, G.; MA, G.; ZHAO, X. Biochar amendment controlled bacterial wilt through changing soil chemical properties and microbial community. Microbiological Research, v. 231, e126373, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126373.

COPLEY, T. R.; ALIFERIS, K. A.; JABAJI, S. Maple bark biochar affects Rhizoctonia solani metabolism and increases damping-off severity. Phytopathology, v. 105, n. 10, p. 1334–1346, 2015. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-14-0231-R.

COPLEY, T.; BAYEN, S.; JABAJI, S. Biochar amendment modifies expression of soybean and Rhizoctonia solani genes leading to increased severity of Rhizoctonia foliar blight. Frontiers in Plant Science, v. 8, e221, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00221.

DAI, Y. et al. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: a meta-analysis. Science of the Total Environment, v. 713, e136635, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635.

DAI, Z. et al. Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes. Biochar, v. 3, p. 239–254, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-021-00099-x.

DE CORATO, U. Soil microbiota manipulation and its role in suppressing soil-borne plant pathogens in organic farming systems under the light of microbiome-assisted strategies. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 7, e17, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s40538-020-00183-7.

DE MEDEIROS, E. V. et al. Biochar as a strategy to manage plant diseases caused by pathogens inhabiting the soil: a critical review. Phytoparasitica, v. 49, n. 4, p. 713–726, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12600-021-00887-y.

DE TENDER, C. et al. Biochar-enhanced resistance to Botrytis cinerea in strawberry fruits (but not leaves) is associated with changes in the rhizosphere microbiome. Frontiers in Plant Science, v. 12, e700479, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.700479.

DISSANAYAKE, D. K. R. P. L. et al. Effect of biochar application rate on macronutrient retention and leaching in two coconut-growing soils. Technology in Agronomy, v. 3, e5, 2023. DOI: https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0005.

DOMINGUES, R. R. et al. Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate. Agronomy, v. 10, n. 6, e824, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10060824.

ELAD, Y. et al. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. Phytopathology, v. 100, n. 9, p. 913–921, 2010. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-9-0913.

ELMER, W. H.; PIGNATELLO, J. J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. Plant Disease, v. 95, n. 8, p. 960–966, 2011. DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741.

FRENKEL, O. et al. The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates? Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, v. 25, n. 2, p. 105–113, 2017. DOI: https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1307202.

GAO, Y. et al. Biochar suppresses bacterial wilt of tomato by improving soil chemical properties and shifting soil microbial community. Microorganisms, v. 7, n. 12, e676, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms7120676.

GRABER, E. R. et al. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? Carbon Management, v. 5, n. 2, p. 169–183, 2014. DOI: https://doi.org/10.1080/17583004.2014.913360.

IACOMINO, G. et al. The suppressive effects of biochar on above- and belowground plant pathogens and pests: a review. Plants, v. 11, n. 22, e3144, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11223144.

JAISWAL, A. K. et al. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. Soil Biology and Biochemistry, v. 69, p. 110–118, 2014.

JAISWAL, A. K. et al. Linking the belowground microbial composition, diversity and activity to soilborne disease suppression and growth promotion of tomato amended with biochar. Scientific Reports, v. 7, e44382, 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/srep44382.

JAISWAL, A. K. et al. Molecular insights into biochar-mediated plant growth promotion and systemic resistance in tomato against Fusarium crown and root rot disease. Scientific Reports, v. 10, e13934, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-70882-6.

JIN, X. et al. Biochar stimulates tomato roots to recruit a bacterial assemblage contributing to disease resistance against Fusarium wilt. iMeta, v. 1, e37, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/imt2.37.

JIN, X. et al. Biochar amendment suppressed Fusarium wilt and altered the rhizosphere microbial composition of tomatoes. Agronomy, v. 13, n. 7, e1811, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13071811.

LAIRD, D. et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma, v. 158, n. 3–4, p. 436–442, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota: a review. Soil Biology and Biochemistry, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

LIU, C. et al. More microbial manipulation and plant defense than soil fertility for biochar in food production: a field experiment of replanted ginseng with different biochars. Frontiers in Microbiology, v. 13, e1065313, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1065313.

LIU, Z. et al. Biochar and its coupling with microbial inoculants for suppression of soil-borne plant diseases. Applied Soil Ecology, 2023.

MELLER HAREL, Y. et al. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. Plant and Soil, v. 357, n. 1–2, p. 245–257, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3.

MENDES, R. et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. Science, v. 332, n. 6033, p. 1097–1100, 2011.

MIA, S. et al. Aging-induced changes in biochar's functionality and adsorption behavior for phosphate and ammonium. Environmental Science & Technology, v. 51, n. 15, p. 8359–8367, 2017. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00647.

OMONDI, M. O. et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. Geoderma, v. 274, p. 28–34, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029.

POVEDA, J. et al. The use of biochar for plant pathogen control. Phytopathology, v. 111, n. 9, p. 1490–1499, 2021. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0248-RVW.

QUILLIAM, R. S. et al. Biochar and its use as a carrier for microbial inoculants. Soil Biology and Biochemistry, v. 65, p. 287–293, 2013.

RASOOL, M. et al. Role of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria in the management of tomato early blight disease. Scientific Reports, v. 11, e6092, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-85633-4.

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. Geoderma, v. 361, e114055, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055.

SCHLATTER, D. et al. Disease suppressive soils: new insights from the soil microbiome. Phytopathology, v. 107, n. 11, p. 1284–1297, 2017.

SILVA, L. G. et al. Biochar amendment increases soil microbial biomass and plant growth and suppresses Fusarium wilt in tomato. Tropical Plant Pathology, v. 45, p. 73–83, 2020.

SINGH, H. et al. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. Biochar, v. 4, e8, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1.

SUN, F.; LU, S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 177, n. 1, p. 26–33, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/jpln.201200639.

SUN, Z. et al. Effects of biochar on soil chemical properties: a global meta-analysis of agricultural soil. Plant, Soil and Environment, v. 68, n. 6, p. 272–289, 2022. DOI: https://doi.org/10.17221/522/2021-PSE.

WANG, L. et al. Biochar aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications. Environmental Science & Technology, v. 54, n. 23, p. 14797–14814, 2020. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04033.

WANG, W. et al. Biochar application alleviated negative plant-soil feedback by modifying soil microbiome. Frontiers in Microbiology, v. 11, e799, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00799.

WELLER, D. M. et al. Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. Annual Review of Phytopathology, v. 40, p. 309–348, 2002.

YAN, H. et al. Biochar-mediated changes in the microbial communities of rhizosphere soil alter the architecture of maize roots. Frontiers in Microbiology, v. 13, e1023444, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1023444.

YANG, Y. et al. A quantitative evaluation of biochar's influence on plant disease suppression: a global meta-analysis. Biochar, v. 4, e43, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-022-00164-z.

ZHANG, Z. et al. Biochar mitigates Fusarium wilt by regulating the rhizosphere microbial community structure. Pest Management Science, v. 82, n. 9, p. 8936–8949, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/ps.70940.

ZWART, D. C.; KIM, S. H. Biochar amendment increases resistance to stem lesions caused by Phytophthora spp. in tree seedlings. HortScience, v. 47, n. 12, p. 1736–1740, 2012. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.12.1736.