

Campinas, SP / Dezembro, 2024



Biocarvão de taboa (*Typha domingensis* Pers.) na fertilidade do solo e produtividade do tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.)

Mateus Corrêa Emerick⁽¹⁾, Daniel Basílio Zandonadi⁽²⁾, Cícero Celio Figueiredo⁽³⁾, André Luiz dos Santos Furtado⁽⁴⁾, Francisco de Assis Esteves⁽²⁾ e Marcos Paulo Figueiredo-Barros⁽²⁾

⁽¹⁾ Estudante de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, RJ. ⁽²⁾ Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, RJ. ⁽³⁾ Professor, Universidade de Brasília, Brasília, DF. ⁽⁴⁾ Pesquisador, Embrapa Territorial, Campinas.

Resumo – O biocarvão produzido a partir de resíduos vegetais é uma alternativa viável para reduzir emissões de gases de efeito estufa, além de ser usado como fertilizante e condicionador do solo. A produção do biocarvão foi feita usando taboa (*Typha domingensis* Pers.), macrófita aquática usada na fitorremediação de corpos hídricos. A pirólise foi feita a 500 °C, com tempo de residência de 5 horas, e rendimento do processo de 37,8%. Um experimento foi instalado em casa de vegetação, para avaliar os efeitos do uso do biocarvão de taboa na fertilidade do solo, no sequestro de carbono, além de alterações na produtividade do tomate Micro-Tom (*Solanum lycopersicum* L.). Foram avaliados parâmetros de fertilidade e liberação de nutrientes no solo. O desenvolvimento agrônomo da cultura foi avaliado usando informações de biometria, massa fresca e massa seca das plantas e dos frutos, número de flores e frutos produzidos, área foliar e taxas de fotossíntese. Foram estimadas, ainda, as concentrações de nutrientes nas plantas. Os benefícios relacionados a fertilidade do solo e teores de nutrientes, além do aumento nos teores de potássio nos tecidos das plantas, não se refletiram em aumento da produtividade. As respostas negativas possivelmente estão relacionadas aos teores do sódio nos estandes de taboa que crescem na Lagoa de Imboassica, Macaé, RJ. As análises de carbono orgânico total demonstraram que, no substrato usado como controle, o percentual de carbono mineralizado foi de 38,65%, enquanto, no tratamento com biocarvão acrescido, o percentual foi de 8,57%, confirmando o sequestro de carbono em forma estável no solo.

Termos para indexação: carbono, pirólise, produtividade agrícola, sequestro de carbono.

Cattail (*Typha domingensis* Pers.) biochar in soil fertility and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) productivity

Abstract – Biochar produced from plant residues is a viable alternative to reduce greenhouse gas emissions and may also be used as a fertilizer and soil conditioner. Biochar was produced using cattail (*Typha domingensis* Pers.), an aquatic macrophyte used in the phytoremediation of water bodies. Pyrolysis was carried out at 500 °C, with a residence time of 5 hours, and a process yield of 37.8%. A greenhouse experiment was set up to evaluate the effects of using

Embrapa Territorial
Av. Soldado Passarinho, nº 303
Fazenda Chapadão
13070-115, Campinas, SP
www.embrapa.br/territorial
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Luciola Alves Magalhães

Secretária-executiva

Bibiana Teixeira de Almeida

Membros

André Luiz dos Santos Furtado,

Celina Maki Takemura, Janice

Freitas Leivas, Rafael Mingoti,

Suzilei Francisca de Almeida

Gomes Carneiro, Vera Viana

dos Santos Brandão, Jaudete

Daltio, Cristina Criscuolo, Rogério

Resende Martins Ferreira e

Daniela Tatiane de Souza

Edição executiva

Bibiana Teixeira de Almeida

Revisão de texto

Bibiana Teixeira de Almeida

Normalização bibliográfica

Vera Viana dos Santos Brandão

(CRB-8/7283)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Suzilei Carneiro

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

cattail biochar on soil fertility, carbon sequestration, and changes in productivity of Micro-Tom tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). Soil fertility parameters and nutrient release were evaluated. The agronomic development of the crop was evaluated using information on plant and fruit biometry, fresh and dry mass, number of flowers and fruits produced, leaf area, and photosynthesis rates. Nutrient concentrations in plants were also estimated. The benefits related to soil fertility and nutrient content, as well as the increase in potassium levels in plant tissues were not reflected in increased productivity. The negative responses are possibly related to sodium levels in the cattail stands that grow in Imboassica Lagoon, Macaé, RJ. Total organic carbon analyses showed 38.65% of mineralized carbon in the substrate used as a control, against 8.57% in the treatment with added biochar, thus confirming the sequestration of carbon in a stable form in the soil.

Index terms: carbon, pyrolysis, agricultural productivity, carbon sequestration.

Introdução

Typha domingensis Pers. é uma macrófita aquática (Thomaz; Esteves, 2011; Godwin-Egein et al., 2018; Lesiv et al., 2020; Córdova et al., 2022) perene, denominada popularmente como taboa, que cresce em ambientes alagadiços. Tem alta capacidade de absorver nutrientes do sedimento e da água e disponibilizá-los para outros compartimentos do ecossistema. Essa espécie tem grande capacidade reprodutiva, é abundante em seus ambientes, e forma densos agrupamentos chamados de estandes (Marques et al., 2019). Por ser uma planta aquática emersa, apresenta altos teores de lignina em seus tecidos de sustentação. Somadas, essas características indicam alto potencial de acumulação de carbono (C) e nutrientes em sua biomassa (Khider et al., 2012), o que favorece a sua utilização em sistemas alagados construídos (SACs) e como matéria-prima para a fabricação de fertilizantes orgânicos.

Por outro lado, na literatura, há diversos exemplos dos danos e prejuízos causados pelo crescimento exacerbado e descontrolado das macrófitas aquáticas, tais como perda de biodiversidade, redução da concentração de oxigênio disponível na coluna d'água e aceleração do processo de eutrofização (Pompêo, 2017). Concomitantemente, pode haver prejuízos econômicos, como a redução da água potável e das áreas de lazer e o impedimento da navegação (Thomaz; Esteves, 2011). Em reservatórios de hidrelétricas, podem ocorrer crescimentos prolíficos

de macrófitas, acarretando problemas nas turbinas e, por consequência, diminuição da produção de energia elétrica (Rørslett et al., 1989; Da Luz et al., 2022; Pompêo, 2017). É necessário oferecer alternativas para o reaproveitamento dessa biomassa, de forma a conjugar a mitigação das consequências negativas da eutrofização artificial dos ambientes aquáticos.

Estudos recentes demonstraram potencial farmacológico de *T. domingensis* em atividades trombolíticas e antimicrobianas, com baixa toxicidade (Dilshad et al., 2022). Na indústria, as fibras podem ser utilizadas como reforço em materiais biocompostos (Diouf; Gning, 2024). Por exemplo, as fibras da taboa são utilizadas com sucesso na confecção de utensílios e móveis (Huguet-Marques, 2015). São materiais valorizados por serem sustentáveis e por suas propriedades mecânicas, comparáveis às de fibras sintéticas, mas com menor impacto ambiental. Outra possibilidade é a utilização dessa matéria-prima para a produção de biocarvão, que é obtido por meio da pirólise de biomassa, um processo térmico que ocorre na ausência ou em baixa concentração de oxigênio e transforma a natureza dos compostos de carbono originais, resultando em um material mais homogêneo e estável (Mohanty et al., 2024).

A produção de biocarvão a partir de *T. domingensis* viabiliza a utilização de uma planta que ocorre em abundância em ambientes aquáticos, como rios, lagoas, canais e reservatórios artificiais. Vale ressaltar que o biocarvão tem alta capacidade de adsorver nutrientes, como nitrogênio e fósforo (Sousa; Figueiredo, 2016). Isso ocorre devido à sua estrutura porosa e à sua superfície carregada negativamente, que atrai e retém íons (Alkharabsheh et al., 2021). Ao capturar esses nutrientes antes que eles possam ser levados para corpos d'água, o biocarvão poderia mitigar as consequências negativas do seu descarte em excesso. O acréscimo de biocarvão altera propriedades físico-químicas do solo. Ao aumentar a porosidade do substrato, o produto fornece espaço para a proliferação de bactérias, reduz a lixiviação de nutrientes e favorece a percolação da água no solo (Wang et al., 2020; Alkharabsheh et al., 2021; Bai et al., 2024; Gao; Masiello, 2024; Jeffery et al., 2024; Lehmann; Joseph, 2024; Thies et al., 2024).

A proliferação intensa de macrófitas aquáticas, como a taboa, e a destinação inadequada de resíduos orgânicos constituem um problema a ser resolvido pela administração pública e por empresas privadas, não apenas em escala local. Converter sua massa seca em biocarvão pode constituir uma alternativa viável para diminuir o volume de resíduos que chegam aos depósitos de lixo e aterros sanitários (Zelaya, 2016). Espécies como a taboa, que trazem

sério desequilíbrio às comunidades e ao ecossistema como um todo em áreas urbanas e ambientes eutrofizados, podem e devem ser adequadamente recolhidas e processadas (Pompêo, 2017).

A demanda por alimentos saudáveis cultivados com adubos orgânicos vem crescendo no Brasil. O biocarvão pode representar uma fonte nutricional alternativa e sustentável, garantir o aumento da qualidade do solo e diminuir a necessidade de fertilizantes químicos (Guimarães et al., 2017). Como já foi exposto anteriormente, o esforço de mitigação do efeito estufa pode concentrar-se no sequestro e na fixação de carbono, não apenas na redução das emissões. Atualmente o dióxido de carbono (CO₂) é uma *commodity* negociada mundialmente. Os países em geral podem comprar créditos de carbono no mercado, para ajudar a cumprir metas ambientais e econômicas (Abboud, 2013).

Este estudo apresenta uma abordagem para reutilizar resíduos orgânicos resultantes das podas periódicas de taboas usadas em SACs. A estratégia adotada envolve o uso de biocarvão derivado da taboa no cultivo de tomateiros, em ambiente de casa de vegetação. Os objetivos incluem a avaliação da efetividade do biocarvão de taboa no incremento da fertilidade do solo, no sequestro de carbono no biocarvão e na produtividade das culturas, utilizando, para isso, o tomate como planta modelo. As hipóteses testadas são as de que o biocarvão: pode ser usado no sequestro de carbono no solo, por ser a taboa uma macrófita emersa, rica em lignina (Esteves, 1998); e pode ser usado como condicionador do solo e trazer benefícios ao plantio de tomates, porque a matéria orgânica que constitui sua matéria-prima é rica em fósforo (P), potássio (K) e outros nutrientes.

O trabalho conjunto, agregando os olhares distintos das ciências Limnologia e Agronomia, pretende gerar resultados significativos para a solução de problemas ambientais. Cabe ressaltar que a produção e utilização de biocarvão a partir de *T. domingensis* (Pers.) está em alinhamento direto com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 12 da Organização das Nações Unidas (ONU), "Consumo e Produção Responsáveis", além do ODS 13, "Ações contra a Mudança Global do Clima" (United Nations General Assembly, 2015).

Material e métodos

Área de estudo

A biomassa de *Typha domingensis* foi coletada na margem sul da Lagoa de Imboassica (Macaé, RJ) (Figura 1). Trata-se de uma das muitas lagoas

costeiras do País, situada na costa norte do estado do Rio de Janeiro, entre os municípios de Macaé e Rio das Ostras. Tem 3,26 km² de área e bacia de drenagem de 50 km². É um sistema raso, com profundidade média de 1,1 m e alcança de 2 a 3 m em suas partes mais profundas (Panosso et al., 1998). A vegetação predominante em suas margens atualmente é formada por bancos de taboa e por gramíneas na área de barra. O clima da região é o tropical úmido, e as médias das temperaturas anuais variam entre 18 °C e 27 °C, com umidade relativa do ar de 83% (Santos et al., 2006).



Figura 1. Local de coleta das amostras de *Typha domingensis* na Lagoa de Imboassica, RJ.

As áreas ao redor da Lagoa de Imboassica têm sido progressivamente ocupadas para a instalação de indústrias, e esse crescimento urbano nas proximidades resultou em diversos impactos antrópicos na lagoa, tais como o aumento na concentração de nutrientes na coluna d'água, devido ao lançamento de esgoto industrial e doméstico sem tratamento (Farias, 2018).

Produção de biocarvão

Após a coleta da biomassa, o material fresco foi seco em estufa, por 72 h, a 60 °C. Após a secagem, o material foi pesado e processado em moinho de facas (SL-32 Forlab). Para a produção do biocarvão, foi feita uma adaptação na metodologia descrita por Sousa e Figueiredo (2016). A biomassa processada de *T. domingensis* Pers. foi submetida ao processo de pirólise lenta (Alkharabsheh et al., 2021), sob temperatura de 500 °C em forno mufla (Linn Elektro Therm). A temperatura foi elevada à taxa de 2,5 °C min⁻¹. O controle de temperatura durante a pirólise foi feito com o uso de um termopar tipo K de penetração, modelo MTK-15, acoplado

a um termômetro digital KT-160A, com tempo de residência de 5 h na temperatura máxima.

Determinação de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN)

O conteúdo de CHN na biomassa seca de *T. domingensis* Pers. no biocarvão obtido e no Latossolo foi determinado por meio do método de Dumas (Figura 2), com o auxílio de um analisador elementar Vario Max CNH 2111 (Nelson; Sommers, 1996).

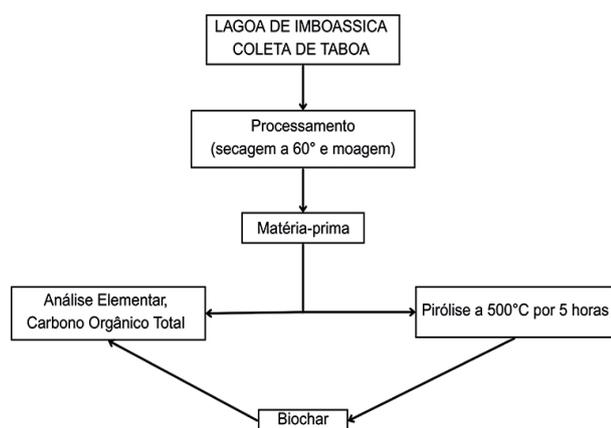


Figura 2. Esquema simplificado mostrando a coleta, o processamento da matéria-prima e a produção do biocarvão através da pirólise e análise de carbono, hidrogênio, nitrogênio e nutrientes.

Uso do biocarvão na produtividade de *Solanum lycopersicum* L.

O efeito do biocarvão de *T. domingensis* foi testado na qualidade do solo e na produtividade de *Solanum lycopersicum* L. (tomate) da variedade Micro-Tom (Scott; Harbaugh, 1989). O Micro-Tom tem seu genoma sequenciado, há amplo conhecimento disponível a seu respeito na literatura e o início da produção de seus frutos ocorre em média até dois meses após a semeadura (Arie et al., 2007; Suthar et al., 2018).

Inicialmente foi escolhido o solo do tipo Latossolo Vermelho, classe textural argila, cujas características físico-químicas, obtidas usando metodologia descrita em Teixeira et al. (2017), são apresentadas na Tabela 1.

Com base nos resultados, foi calculado o quantitativo de carbonato de cálcio (CaCO_3) necessário para a correção do pH do solo (Ribeiro et al., 1999). A mistura de substrato, água e CaCO_3 foi deixada em repouso durante 25 dias. Após esse período, foi acrescido à mistura o fertilizante químico NPK 4-14-08 (N-4%; P_2O_5 - 14%; K_2O - 8%).

Tabela 1. Caracterização físico-química do Latossolo Vermelho utilizado nos experimentos.

Determinação	Unidade	Resultado	Metodologia
pH		4,3	CaCl_2
		5	H_2O
N	%	0,01	NIR
P		0,9	Mehlich
S		247	Fosfato de cálcio
K^+	mg dm^{-3}	0,03	Resina
Ca^{+2}		1	Resina
Mg^{+2}		0,5	Resina
Na^+		0,09	Mehlich
H^+	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	2	Cálculo
Al^{+3}		0,5	KCl
$\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$		2,5	Cálculo
B		0,5	Água quente
Cu		0,2	Mehlich
Fe		28	Mehlich
Mn	mg dm^{-3}	3	Mehlich
Zn		0,4	Mehlich
Co		0,3	Mehlich
Mo		0,3	Água régia
MO	dag kg^{-1}	0,4	Oxidação
CO		0,2	Cálculo
SB		1,6	Cálculo
CTC ef (t)	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	2,1	Cálculo
CTC pH 7 (T)		4,1	Cálculo
V		39	Cálculo
m	%	23,6	Cálculo

NIR, espectrofotometria de infravermelho próximo. SB, soma de bases ($\text{SB} = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). MO, matéria orgânica. CO, carbono orgânico. $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$, acidez potencial (em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Capacidade efetiva de troca catiônica ($\text{CTC ef} = \text{t} = \text{SB} + \text{Al}^{+3}$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Capacidade de troca catiônica a pH 7 ($[\text{CTC pH 7} = \text{T} = \text{SB} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{+3})]$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Saturação por alumínio ($m = 100 \text{ Al}^{+3} \text{ t}^{-1}$, em %). Saturação por bases ($V = 100 \text{ SB T}^{-1}$, em %).

O cálculo foi feito para determinar o quantitativo necessário para elevar a saturação por bases (V%) do substrato a 80%, conforme recomendado em Ribeiro et al. (1999) para a cultura do tomateiro.

Foram feitos dois experimentos. O primeiro, para determinar a dosagem ótima do biocarvão produzido no cultivo do tomate e o segundo, que incluiu dois plantios de tomate, para determinar

o quantitativo de carbono acrescido ao solo e confirmar ou rejeitar os resultados do primeiro experimento, como o beneficiamento do solo e os efeitos na produtividade do vegetal.

Primeiro experimento

Para determinar a melhor dose de aplicação do biocarvão, foi conduzido o primeiro experimento (Figura 3), constituído das seguintes doses: controle (sem adição de biocarvão), 20, 40, 60 e 80 Mg ha⁻¹, totalizando cinco tratamentos, com cinco repetições por tratamento.

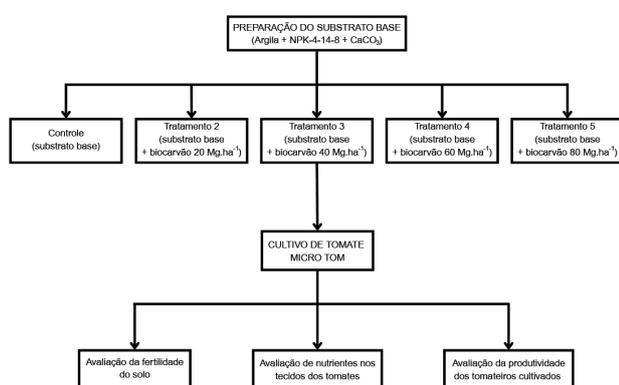


Figura 3. Sistematização da estratégia adotada no primeiro experimento.

Todos os tratamentos tiveram seu pH corrigido e receberam o fertilizante NPK 4-14-8 (Ribeiro et al., 1999). As diferentes dosagens foram dispostas em fileiras de vasos de 0,50 dm³ com aproximadamente 0,35 dm³ de substrato em cada um deles. A germinação das sementes de tomate Micro-Tom foi feita em bandejas de poliestireno estendido (sementeiras), utilizando o substrato comercial Carolina Soil (Santos, 2019). Após 15 dias, foi feito o transplante das plântulas, uma para cada vaso. Nesse estágio, as mudas já apresentavam três folhas compostas cada uma. O cultivo foi feito em casa de vegetação, nas instalações do Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade, em Macaé (RJ). A casa de vegetação está localizada ao nível do mar, nas coordenadas 22°19'37"S e 41°44'8"O. Tem pé-direito de 3 m, com 5 m na parte mais alta, 7 m de largura e 15 m de comprimento. Suas laterais são fechadas com tela antiofídica e sombrite regulável de 50% na parte interna.

Setenta dias após o transplante das mudas, foi feita a contagem do número de flores em cada uma das plantas. O corte da parte aérea foi feito 100 dias

após o transplante, por ocasião do amadurecimento dos frutos. A parte aérea foi utilizada para avaliação das seguintes características: massa fresca por planta, massa fresca dos frutos por planta (feita apenas uma vez, por ocasião do amadurecimento), número de frutos produzido por planta e medição da área foliar por planta. O cálculo do somatório da área total (cm²) de todas as folhas por planta foi feito usando um scanner e o software ImageJ (Schneider et al., 2012). Após as medições da massa fresca e da área foliar de cada planta, os tomateiros foram postos em estufa a 55 °C por 72 h. Após o fim do experimento, foi feita a caracterização do solo. A biomassa seca dos tomateiros também foi separada por tratamento e enviada para determinação dos teores de nutrientes presentes nos tecidos das plantas (Malavolta et al., 1997).

Segundo experimento

No segundo experimento, foi utilizado o mesmo procedimento da etapa anterior na preparação do substrato base. Foram avaliados apenas dois tratamentos. O primeiro plantio foi feito com 15 repetições de cada tratamento e uma planta em cada um dos vasos. O segundo plantio foi feito com dez repetições de cada tratamento e uma planta em cada um dos vasos.

No tratamento controle utilizado em ambos, foram aplicados CaCO₃ e fertilizante NPK 4-14-8, conforme descrito por Ribeiro et al. (1999). O outro tratamento recebeu CaCO₃, fertilizante NPK 4-14-8 e um acréscimo de biocarvão, na proporção de 2% (v/v). Cada tratamento foi alocado em vasos de 1 dm³, com aproximadamente 0,6 dm³ de substrato em cada um deles. Antes de dispor o solo nos vasos e de transplantar as mudas (o plantio e transplante seguiram as mesmas condições do primeiro experimento), foi feita uma amostragem do substrato, para análise de nutrientes e outros aspectos de fertilidade do solo. Os seguintes elementos foram quantificados em todas as análises do solo: potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), alumínio (Al), ferro (Fe), sódio (Na), boro (B), zinco (Zn), manganês (Mn) e cobre (Cu). Também foram determinadas variáveis como matéria orgânica presente (MO), carbono orgânico (CO) e capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, seguindo as diretrizes de Teixeira et al. (2017). As análises foram conduzidas em triplicatas.

Durante o desenvolvimento das plantas, foram avaliados diversos parâmetros, incluindo o número total de flores e frutos, o índice de fluorescência da clorofila nas folhas dos tomateiros, a área foliar, bem como a massa fresca e a massa seca de cada

planta, além do peso total e peso seco dos frutos por planta. Após a colheita dos tomateiros e a medição das variáveis relacionadas à produtividade vegetal, foram feitas análises químicas do substrato (Teixeira et al., 2017). Adicionalmente, parte do substrato foi utilizada para determinar o teor de carbono orgânico total em ambos os tratamentos, segundo a metodologia proposta por Jing et al. (2020).

Após a análise dos resultados do primeiro plantio, as plantas foram descartadas e foi iniciado mais um ciclo de cultivo de *S. lycopersicum* L. (segundo plantio). Foi utilizado o mesmo substrato para produzir dois tratamentos. As raízes das plantas ainda presentes no solo foram removidas de forma criteriosa e, em seguida, secas à temperatura ambiente e peneiradas usando peneiras de malha de 8 mm. Feito isso, o solo foi redistribuído em vasos de 1 dcm³, com aproximadamente 0,5 dcm³ de substrato em cada um deles, tanto para o controle quanto para o tratamento com biocarvão na dosagem de 2% (v/v). O plantio e o transplante das novas mudas foram feitos de acordo com o procedimento descrito no primeiro experimento, e novamente foi transplantada uma muda para cada vaso. O procedimento teve como objetivo avaliar possíveis alterações na disponibilidade de nutrientes, na produtividade do tomateiro e no carbono orgânico total acrescido ao solo, ao estender o tempo de interação do solo com o biocarvão. Também foi feita uma análise quantitativa do sódio no solo e nos tecidos dos tomateiros cultivados. Amostras do substrato base e da biomassa seca dos tomateiros foram coletadas e analisadas, conforme metodologias propostas por Teixeira et al. (2017) e Malavolta et al. (1997).

Carbono orgânico total

Antes do transplante das mudas e do amadurecimento dos frutos no segundo experimento, foram coletadas amostras para análises de carbono orgânico total na matéria-prima processada, no biocarvão produzido e nos substratos utilizados no cultivo do tomateiro. As análises foram feitas utilizando o *Total Organic Analyser* da marca Shimadzu, equipado com o *Solid Sample Module*, modelo SSM 5000A. Este método baseia-se na oxidação por combustão catalítica a 900 °C (Jing et al., 2020). Para quantificar o CO₂, que é proporcional ao carbono presente nas amostras, foi elaborada uma curva de calibração que variou de 0 a 30 mg L⁻³ de carbono, empregando, para isso, uma solução padrão de glicose (Jing et al., 2020).

Análise estatística

As comparações entre os grupos no primeiro experimento foram feitas utilizando os dados coletados para cada uma das variáveis descritas, como área foliar, massa fresca e massa seca da parte aérea, taxas de fotossíntese, número de flores e frutos, além da massa fresca e massa seca dos frutos. Os resultados foram submetidos a análises de regressão, linear e não linear, e à análise de variância (Anova), com nível de significância de $p < 0,05$. Também foi aplicado o teste de Tukey com nível de confiança de 95% (Netto et al., 2006). Os resultados do segundo experimento foram submetidos à análise de variância (Anova) com nível de significância de $p < 0,05$ e ao teste de Tukey com nível de confiança de 95%. Não foi necessário utilizar a análise de regressão nesta etapa. O software utilizado para verificar as diferenças entre grupos, em ambos os experimentos, avaliar a significância dos resultados e gerar os gráficos foi o Prisma.

Resultados e discussão

A partir de 1.400 g de matéria-prima pirolisada foram obtidos 529,10 g de biocarvão, rendimento de aproximadamente 37,8%. Esse valor está dentro das expectativas para o processo de pirólise lenta (Sousa; Figueiredo, 2016). Segundo a literatura, o biocarvão produzido por meio dessa técnica tende a apresentar elevado grau de carbonização, pH alcalino e significativa área de superfície. Os produtos gerados nesse processo são altamente eficazes como melhoradores de solo, no sequestro de carbono e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Borchard et al., 2019).

O método de combustão seca em alta temperatura (Nelson; Sommers, 1996) demonstrou que o carbono e os nutrientes vegetais da matéria-prima original foram concentrados no biocarvão por meio da pirólise. Isso ocorre devido ao efeito conhecido da degradação térmica em um ambiente sem oxigênio, que resulta em perdas gasosas de certos elementos, como carbono, hidrogênio e oxigênio (DeLuca et al., 2024). Os resultados relativos à composição elementar da taboa processada e do biocarvão estão agrupados na Tabela 2.

O percentual de carbono na matéria-prima foi de 50,55%; do conteúdo de 1.400 g de biomassa processada, pode-se inferir que o conteúdo de carbono era de aproximadamente 707,70 g. Em 529,10 g de biocarvão produzido, no qual ocorre a concentração dos minerais pelo processo de pirólise, o conteúdo de carbono apontado pela

Tabela 2. Composição elementar da *Typha domingensis* Pers. e do biocarvão produzido.

Determinação	Unidade	Metodologia	<i>Typha domingensis</i> Pers.	Biocarvão
C			50,55	59,24
H	%	CHN2111	4,33	2,85
N			0,32	1,18
P			0,6	1,6
K			8	43
Ca	g kg ⁻¹	Nitroperclórico	5,8	17,8
Mg			3,4	12,8
S			0,2	2,6
Na			9,8	39,7
Cu			2,5	51,5
Fe			439	790
Mn	mg kg ⁻¹	Nitroperclórico	190	730
Zn			17	62
Al			640	640
B			15,1	35,4
Co	mg kg ⁻¹	Via seca	1,3	---
Mo			2,2	---

análise foi de 59,24% do total, ou aproximadamente 313,43 g (Lehmann et al., 2021). Não foi quantificado neste estudo o percentual de gás carbônico liberado durante a pirólise. A concentração de nutrientes potencialmente disponíveis (N, P, K, Ca, Mg, S) sugere que o biocarvão poderia atuar como condicionador para o solo e aumentar a produtividade da planta escolhida como modelo, a exemplo de outros estudos (Xiao et al., 2018; Wu et al., 2019). Revisões e metanálises mostram que a aplicação do biocarvão, também em virtude dos minerais em sua composição, tende a aumentar a oferta de nutrientes, embora os mecanismos relacionados à adsorção e posterior disponibilização desses nutrientes variem de acordo com matéria-prima, substrato e cultura escolhida (El-Naggar et al., 2018; Wang et al., 2020). Destacaram-se, na composição dos minerais apresentada, os altos teores de potássio, presente nos tecidos da taboa e concentrado no produto da pirólise. A razão elementar entre o quantitativo de hidrogênio e carbono (H/C) no biocarvão produzido é de aproximadamente 0,048. Esse resultado, somado à temperatura utilizada no processo de pirólise (500 °C), é um bom indicador para a resistência do biocarvão à mineralização por microrganismos (Budai et al., 2013). Para determinar o limite mínimo aceitável para cada processo de produção do biocarvão, é preciso considerar o gasto de energia na pirólise, o transporte de matéria-prima, a abundância dessa matéria-prima,

aplicações do produto obtido, dentre outros fatores, como o rendimento (Yang et al., 2021).

Determinação da dosagem ótima de biocarvão de *Typha domingensis* Pers. a ser utilizada no cultivo de *Solanum lycopersicum* L. e reflexos do acréscimo do produto ao solo (primeiro experimento)

Ao longo do experimento, foram observadas mudanças em parâmetros físico-químicos dos substratos, no quantitativo de nutrientes disponíveis e incorporados aos tecidos das plantas. A Tabela 3 traz as médias dos resultados das análises do substrato.

O pH dos substratos que foram acrescidos do biocarvão foi alterado significativamente ($p < 0,05$). A correção da acidez através da aplicação de biocarvão foi constatada em solos de climas tropicais e temperados (Yu et al., 2019; Wang et al., 2020; Alkharabsheh et al., 2021). As restrições químicas para o solo a ser utilizado na agricultura incluem acidez ou alcalinidade excessiva (Ribeiro et al., 1999). Em solos ácidos, a biodisponibilidade de Ca, Mg e P diminui (Yu et al., 2019). Um dos fatores influenciados pelo pH é a comunidade microbiana, particularmente fungos e bactérias, cuja atividade enzimática e consequente participação nas interações solo-planta dependem diretamente da acidez do solo (Rousk et al., 2010).

A aplicação do biocarvão aumentou os teores de elementos minerais no solo.

Particularmente os teores de P e K foram significativamente menores ($p < 0,05$) no tratamento controle em comparação às demais dosagens. O acréscimo nos valores totais de P e K deve-se ao alto conteúdo desses minerais no biocarvão de *Typha domingensis*, concentrados pelo processo de pirólise (Cui et al., 2016). A pronta disponibilização desses elementos é fundamental em substratos tropicais, como os Latossolos, que predominam no Brasil e apresentam teores muito baixos de nutrientes (Sousa, 2015).

Uma metanálise feita por Gao et al. (2019) demonstrou que a aplicação de biocarvão proveniente de matérias-primas como estrume ou resíduo de culturas geralmente aumenta a disponibilidade de P, particularmente quando acrescido a substratos ácidos ou neutros. Vale ressaltar que P é um dos principais elementos determinantes da eutrofização em águas residuais (Meirelles-Pereira; Esteves, 2011; Yu et al., 2019), portanto sua presença é esperada em resíduos de vegetais utilizados em SACs.

Os teores de Ca e Mg não foram afetados significativamente ($p < 0,05$) pela aplicação do biocarvão. Os resultados obtidos não corroboram achados anteriores (Gaskin et al., 2010; Laghari et al., 2015; Sousa; Figueiredo, 2016) que atestaram incremento na concentração de P e K, mas também de Ca e Mg. A saturação por bases (V%), um reconhecido indicador de fertilidade do solo (Ribeiro et al., 1999), apresentou aumento significativo com o acréscimo do biocarvão produzido, refletindo o aumento nos teores de K e possivelmente Na.

Não foi possível, ao fim da primeira etapa, obter massa seca suficiente para fazer análises em triplicatas nos tecidos foliares das plantas cultivadas. A perda de plantas nas diferentes dosagens de biocarvão foi maior que no tratamento controle não alterado. É possível inferir que tanto o aumento na concentração de nutrientes, como o P, quanto alterações em parâmetros físico-químicos não tiveram como consequência uma melhoria consistente no balanço nutricional dos tomateiros. O volume dos vasos e a quantidade de substrato utilizada podem ter influenciado os resultados. Os teores ideais para cada nutriente em tecidos de *Solanum lycopersicum* L. (Malavolta et al., 1997) são apresentados na Tabela 4.

A concentração de K nos tecidos apresentou aumento discreto na faixa entre 20 e 60 Mg ha⁻¹ e a de N, entre 20 e 40 Mg ha⁻¹. Wang et al. (2020) e Biliás et al. (2023) enfatizam que a maioria dos biocarvões, produzidos a partir de diferentes matérias-primas, tem se mostrado uma excelente estratégia para fornecimento de K às culturas.

Tabela 4. Teores de nutrientes nos tomateiros, em resposta às diferentes dosagens de biocarvão (primeiro experimento).

Determinação	Ideal*	Controle	1%	2%	3%	4%	
N	45,9	16,6	18,1	17,3	16,2	16,4	
P	5,6	4	4,2	3,8	3,3	4,1	
K	57,2	25,8	27,3	27,2	29,7	24,7	
Ca	g kg ⁻¹	44	18,7	17,2	14,2	15,8	13,2
Mg	5	5,3	4,4	3,6	4,5	3,3	
S	**	4,1	4	3,4	5,4	4,3	
B	**	37	32	33	31	37	
Cu	40	91	65	71	59	45	
Fe	mg kg ⁻¹	268	487	555	690	761	338
Mn	290	26	12	14	16	14	
Zn	37	21	14	10	11	10	

*Faixa ótima de referência para os nutrientes listados, conforme a norma estabelecida e disposta em Ribeiro et al. (1999). **Sem valores de referência. N: (LQ: 0,6 g kg⁻¹) – digestão sulfúrica. P: (LQ: 0,01 g kg⁻¹). K: (LQ: 0,3 g kg⁻¹). Ca: (LQ: 0,1 g kg⁻¹). Mg: (LQ: 0,01 g kg⁻¹). S: (LQ: 0,04 g kg⁻¹). Cu: (LQ: 2 mg kg⁻¹). Fe: (LQ: 2 mg kg⁻¹). Mn: (LQ: 3 mg kg⁻¹). Zn: (LQ: 0,6 mg kg⁻¹) – digestão nitroperclórica. B: (LQ: 0,04 mg kg⁻¹) – digestão por via seca.

Fonte: Malavolta et al. (1997).

Era esperado que o incremento no quantitativo de P resultasse em maior absorção desse elemento pelos vegetais, o que aparentemente não ocorreu. A maioria dos compostos de P é pouco solúvel nas soluções de água e solo, o que representa um dos grandes desafios no fornecimento do mineral às plantas (Petrova; Yordanova, 2020).

Aparte aérea das plantas cultivadas foi utilizada para medir variáveis relacionadas à produtividade. Mesmo com a melhoria em fatores relacionados à fertilidade do solo, a aplicação do biocarvão não promoveu o incremento esperado no desenvolvimento vegetativo da cultura de tomate Micro-Tom. As medições de número absoluto de flores e de frutos, área foliar e peso total da parte aérea e dos frutos foram utilizados para produzir a Figura 4.

A análise de regressão, a análise de variância e o teste de Tukey ($p < 0,05$) confirmaram que nenhuma das variáveis ligadas a produtividade total, agrupadas na Figura 2, sofreram alterações consistentes. Vale ressaltar que o desvio-padrão apresentado no ensaio foi elevado, o que dificultou que qualquer tendência, linear ou não, pudesse ser evidenciada. A taxa de mortalidade entre os tomateiros nos tratamentos nos quais o biocarvão foi adicionado foi alta, o que sugere a possibilidade de um elemento fitotóxico associado. Não houve perdas entre as plantas utilizadas como controle. Estudos diversos, reunidos por Mukherjee e Lal

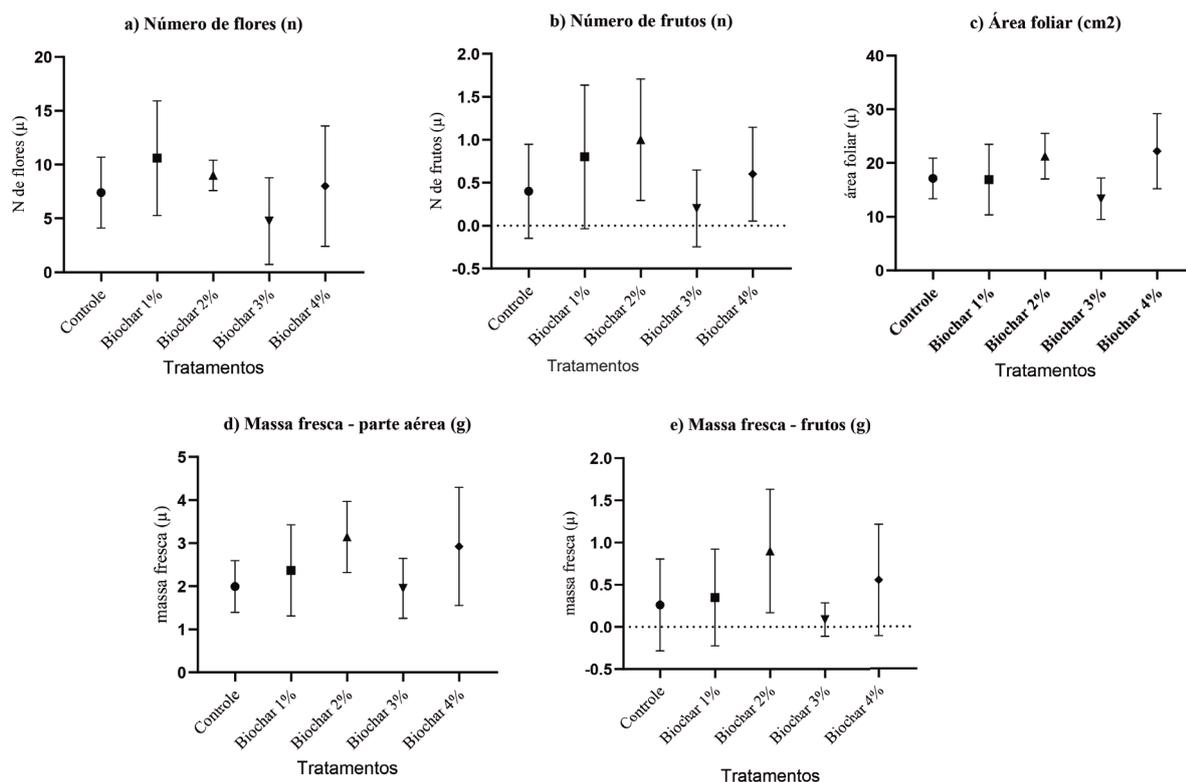


Figura 4. Efeito das diferentes dosagens na produtividade de tomate Micro-Tom. (a) Número absoluto de flores nas plantas; (b) número absoluto de frutos; (c) área foliar; (d) peso total da parte aérea; (e) peso total dos frutos.

(2014), Hussain et al. (2017), Wang et al. (2020) e Alkharabsheh et al. (2021), mostram efeitos mistos da aplicação do biocarvão na produtividade dos vegetais. Os autores afirmam que a produtividade vegetal pode aumentar ou não aumentar com o uso do produto, a depender de matéria-prima, grupos funcionais do biocarvão, taxas de aplicação, solo e planta escolhidos, dentre outros fatores. Como não foi possível estabelecer a dosagem ótima de biocarvão para o substrato escolhido, foi feita uma escolha com base na literatura disponível (Novak et al., 2009; Mukherjee; Lal, 2014; Glaser et al., 2015; Laghari et al., 2015; Hussain et al., 2017; Pfister; Saha, 2017; Poormansour et al., 2019; Alkharabsheh et al., 2021; Mosharraf et al., 2021; Lehmann et al., 2021), segundo a qual diversos autores alcançaram resultados positivos em dosagens mais baixas do produto.

Teste do biocarvão de *Typha domingensis* Pers. a 2% (v/v) no cultivo de *Solanum lycopersicum* L (segundo experimento)

A aplicação do biocarvão de *Typha domingensis* Pers. na dosagem de 2% (v/v) apresentou resultado negativo para a maioria dos parâmetros relacionados

à produtividade de *Solanum lycopersicum* L. Para área foliar e índices de fluorescência de clorofila não houve diferença significativa entre as duas dosagens. Indicadores como número absoluto de flores e frutos, peso total e peso seco da parte aérea das plantas e dos frutos em separado apresentaram redução significativa. Na Figura 5, são apresentados gráficos de barras que expressam o número absoluto de flores e frutos produzidos, o peso total e peso seco das plantas e dos frutos no primeiro plantio. Não houve diferença significativa nos resultados da produtividade dos tomateiros entre o primeiro e o segundo plantio. Vale ressaltar que, com a utilização do biocarvão de taboa, a mortalidade entre as plantas foi elevada durante todo o segundo experimento. A Figura 6 destaca as medições da área foliar e dos índices relacionados à fluorescência de clorofila.

Uma folha composta em cada um dos tomateiros foi utilizada para as medições dos índices relacionados com a fluorescência de clorofila. Os resultados das medições de área foliar das plantas e dos índices relacionados à fluorescência de clorofila (Figura 6) sugerem que o desempenho do fotossistema II (Camprostrini, 2001) não foi

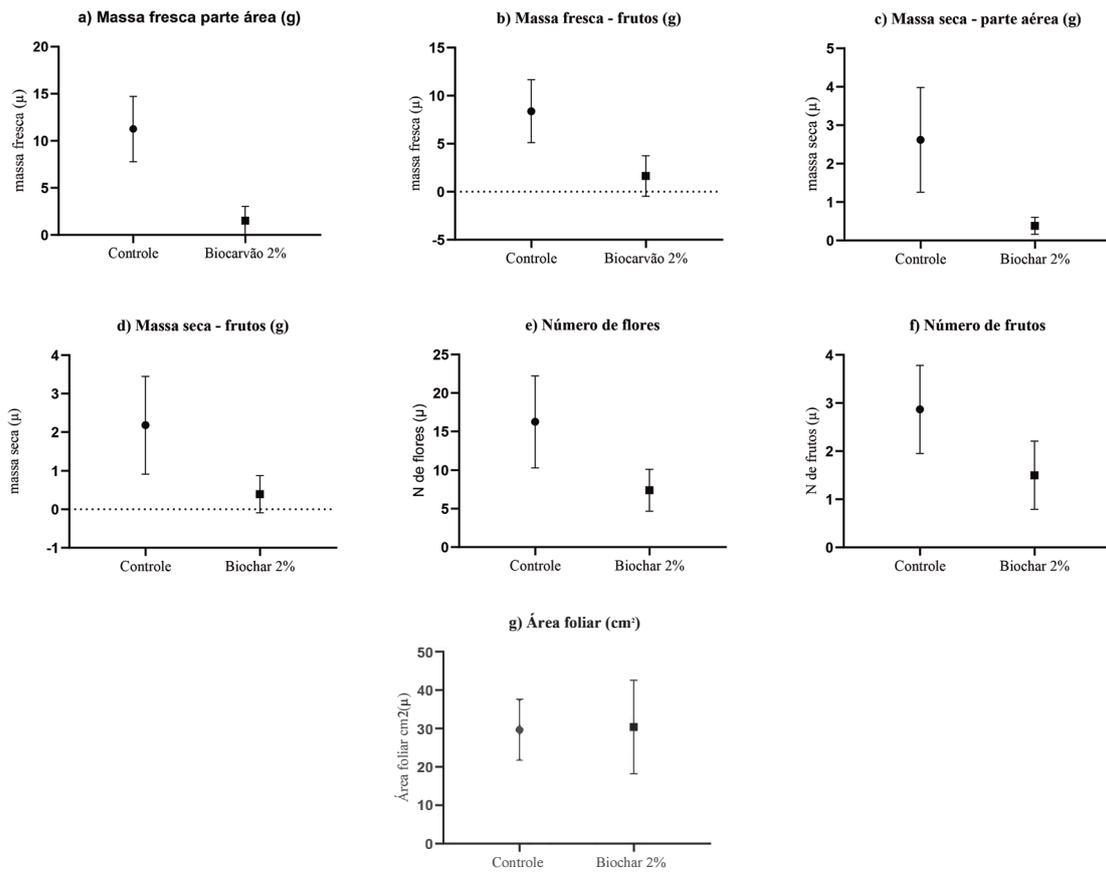


Figura 5. Comparativo entre o controle não alterado e a dosagem com biocarvão a 2% (v/v), relativo a fatores relacionados à produtividade vegetal na cultura de tomate Micro Tom (segundo experimento). (A) Peso total da parte aérea das plantas; (B) peso total dos frutos em separado; (C) peso seco da parte aérea; (D) peso seco dos frutos em separado; (E) número absoluto de flores; (F) número absoluto de frutos.

afetado pelo acréscimo de biocarvão. A taxa de mortalidade foi maior entre os tomateiros cultivados no solo acrescido do biocarvão. Apenas 9 entre 15 plantas (60%) chegaram ao fim do experimento. No tratamento controle não alterado, a taxa de sobrevivência foi de 100%. Com o uso do biocarvão, o rendimento foi reduzido em 27% para *Oryza sativa* L. (Asai et al., 2009), 11% para *Triticum* spp. (Aguilar-Chávez et al., 2012), 36% para *Zea mays* L. (Gaskin et al., 2010), 74% para *Lactuca sativa* L. (Deenik et al., 2010) e 2% para *Solanum lycopersicum* L. (Nzanza et al., 2012).

Uma possível causa para as reduções observadas na produtividade dos tomateiros cultivados é o quantitativo de sódio no biocarvão produzido (Tabela 2). O tomate é moderadamente tolerante à presença de cloreto de sódio (NaCl) no solo ou na água de irrigação (Cuartero; Fernandez-Muñoz, 1998). O excesso de salinidade leva a uma série de efeitos deletérios, como redução no

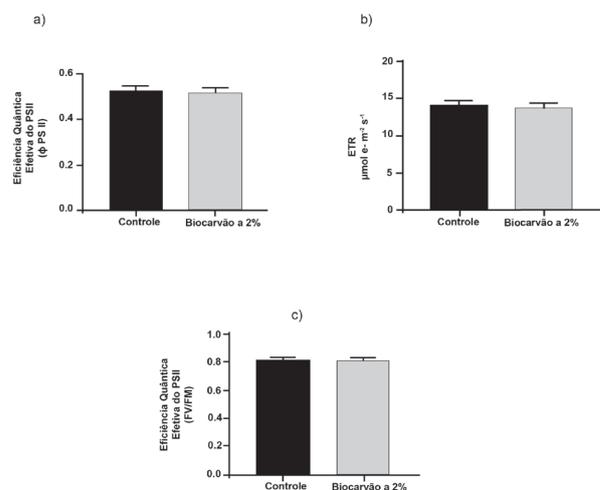


Figura 6. Comparativo entre o controle não alterado e a dosagem na qual o biocarvão foi acrescido a 2% (v/v) (segundo experimento). (a) Eficiência quântica efetiva, (b) taxa de transporte de elétrons e (c) eficiência quântica potencial em *Solanum lycopersicum* L.

crescimento da parte aérea, na biomassa foliar e radicular, além de indução da senescência prematura das folhas, de alterações na absorção de nutrientes, e, finalmente, redução no número e peso de flores e frutos produzidos (Cuartero; Fernandez-Muñoz, 1998; Hoffmann et al., 2021). Não foi feita análise da condutividade elétrica do solo, o que poderia trazer dados adicionais.

Uma outra possibilidade seria a retenção de nutrientes por parte do biocarvão. Os mecanismos de interação entre os minerais presentes no produto e no solo ainda carecem de elucidação e são específicos, de acordo com matéria-prima, processo de pirólise utilizado, dentre outros fatores (Alkharabsheh et al., 2021). É possível que a liberação dos nutrientes e sua disponibilidade para as plantas ocorra gradualmente. Gaskin et al. (2010) relatam que a produtividade de *Zea mays* L. (milho) diminuiu no primeiro ano de cultivo, em proporção às taxas de aplicação de biocarvão. No segundo ano, foi feito o plantio de *Triticum aestivum* L. (trigo). Foi constatada a colonização das raízes do trigo por micorrizas, o que induziu aumento na produtividade. Os autores, em suas conclusões, citam trabalhos diversos, como os de Kimetu et al. (2008) e Major et al. (2010), nos quais os efeitos positivos aparecem apenas no segundo ano de cultivo.

Ao longo do segundo experimento, foram feitas três amostragens no substrato utilizado no cultivo dos tomateiros. As médias dos resultados são apresentadas na Tabela 5.

As diferenças significativas ($p < 0,05$) em relação ao controle, constatadas no primeiro experimento, mantiveram-se. Alterações em propriedades físico-químicas promovidas pelo acréscimo do biocarvão, registradas em outros trabalhos, como na alcalinidade, CTC do solo (Lehmann; Joseph, 2024), saturação de bases (V%) (Alkharabsheh et al., 2021), nos teores de K e P (Wang et al., 2020). Em relação ao P, o número chegou a um valor máximo e decaiu, provavelmente devido às perdas por lixiviação e/ou utilização do mineral pelo metabolismo das plantas ao longo do cultivo. Esse resultado evidencia a liberação gradual do P presente no biocarvão, a exemplo de trabalhos relacionados por Mukherjee e Lal (2014) e Jin et al. (2019).

O quantitativo inicial de K no biocarvão a 2% foi de aproximadamente $549,3 \text{ mg dcm}^{-3}$ até $234,1 \text{ mg dcm}^{-3}$. O percentual do mineral que provavelmente foi perdido por lixiviação e/ou utilizado pelos tomateiros foi de aproximadamente 57,38%. No tratamento controle não alterado, o quantitativo inicial de K foi de aproximadamente $177,7 \text{ mg dcm}^{-3}$ (7/7/2022) até $81,4 \text{ mg dcm}^{-3}$

em 7/2/2023. A redução foi de aproximadamente 54,18%. Não foi constatada diferença significativa nos teores de Ca e Mg. Não foi encontrado nas análises do substrato nenhum fator que justificasse a produtividade reduzida dos tomateiros cultivados usando o biocarvão.

Ao fim do segundo experimento, foi feita uma bateria de análises nos tecidos das plantas cultivadas. Os resultados das análises, conforme procedimento disposto em Malavolta et al. (1997), são listados na Tabela 6.

No tratamento com biocarvão a 2% (v/v), os teores de K, P, B, Cu, Fe, Zn e Na nos tomateiros foram maiores que no tratamento controle. A liberação gradual de P no substrato (Petrova; Yordanova, 2020) pode ter se refletido no aumento do P nos tecidos da nova leva de tomateiros cultivados. Os resultados demonstram que os teores de Na no substrato são significativamente mais altos no tratamento com o biocarvão. Esse fato se refletiu em maior absorção de Na pelas plantas cultivadas às quais o biocarvão foi acrescido. O teor de Na encontrado no substrato do tratamento controle foi de $9,3 \text{ mg dm}^{-3}$. No tratamento com biocarvão 2% (v/v), o valor foi de $38,3 \text{ mg dm}^{-3}$. As análises dos tecidos mostram que, no tratamento controle, as plantas apresentavam $9,4 \text{ g kg}^{-1}$. No tratamento com biocarvão a 2%, foram encontrados $11,4 \text{ g kg}^{-1}$.

Mizrahi et al. (1988) cultivaram *S. lycopersicum* L. em concentrações crescentes de NaCl. Os autores constataram que a salinidade diminuiu consideravelmente o peso e o número de frutos produzidos, além de reduzir os níveis de Ca nos tecidos dos tomateiros. Idowu e Aduayi (2007) investigaram a razão adequada de Na e K no solo para o cultivo de *S. lycopersicum* (tomate). Os autores confirmaram que o Na, quando aplicado em conjunto com o K, tem efeitos positivos sobre a cultura de tomate, desde que em proporções adequadas. A aplicação de 2 a 4 mg kg^{-1} de Na acrescido de 32 a 64 mg kg^{-1} de K (razões entre 1:8 e 1:32) aumentou os níveis de N na parte aérea dos tomateiros e o número de flores e de folhas, variáveis que se traduziram em aumento de 100% na produção de frutos. Correlações distintas entre Na e K acrescidos ao solo, com níveis proporcionalmente mais elevados de Na, resultaram em efeitos deletérios sobre as plantas cultivadas, como atrofiamento da parte aérea, diminuição na produção de clorofila, amarelamento das folhas e redução do número de frutos. A razão entre Na e K encontrados no biocarvão utilizado no presente trabalho era de $39,7 / 49,5 \text{ g kg}^{-1}$.

Tabela 5. Propriedades físico-químicas e teores de nutrientes relativos aos substratos utilizados nos tratamentos controle e com biocarvão a 2% (v/v) (segundo experimento).

Determinação	Controle						Biocarvão a 2%								
	7/7/2022		12/10/2022		7/2/2023		7/7/2022		12/10/2022		7/2/2023				
	(μ)	(σ)	(μ)	(σ)	(μ)	(σ)	(μ)	(σ)	(μ)	(σ)	(μ)	(σ)			
pH (água)	6,77	0,25	7,07	0,23	6,80	0,20	2,94	7,43	0,15	7,67	0,06	0,78	7,40	0,17	2,34
pH (CaCl ₂)	6,10	0,00	6,13	0,12	6,37	0,15	2,40	7,03	0,06	7,10	0,10	1,41	6,83	0,21	3,05
N total	0,08	0,05	62,50		0,08	0,04	50,00								
P Meh 1	98,97	16,25	106,23	18,05	65,67	11,17	17,01	106,20	10,64	148,30	5,70	3,84	99,83	8,62	8,63
K ⁺	177,67	23,63	85,33	17,24	91,40	6,62	7,24	549,33	83,53	286,33	10,50	3,67	234,13	12,06	5,15
S-SO ₄ ⁻²	210,00	46,16	72,33	1,53	9,33	1,53	16,37	173,67	36,90	61,33	2,31	3,77	38,33	3,51	9,16
K ⁺	0,46	0,06	13,04	0,04	21,55	1,49	6,92	1,40	0,22	0,73	0,03	4,11	18,06	0,82	4,53
Ca ⁺²	2,26	0,28	12,39	0,14	0,23	0,02	6,55	2,16	0,37	1,99	0,15	7,54	0,60	0,04	6,01
Mg ⁺²	0,85	0,20	23,53	0,02	1,32	0,03	2,43	0,78	0,14	0,69	0,31	44,93	1,72	0,14	8,14
Al ⁺³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,06	12,37
H + Al	1,27	0,12	9,45	1,07	0,00	0,00	0,00	0,93	0,06	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MO	0,30	0,06	20,00	0,12	0,70	0,10	14,29	0,40	0,00	0,80	0,00	0,00	0,57	0,12	20,38
CO	0,20	0,00	0,00	0,12	0,43	0,06	13,95	0,20	0,00	0,43	0,06	13,95	0,33	0,06	17,32
B	1,25	0,20	16,00	0,10	16,39	0,11	10,19	0,97	0,22	0,52	0,15	28,85	0,16	0,03	21,65
Cu	0,20	0,00	0,00	0,00	0,53	0,06	10,83	0,27	0,06	0,57	0,06	10,53	1,13	0,23	20,38
Fe	5,00	0,00	0,00	1,53	52,67	9,02	17,12	4,00	0,00	10,67	0,58	5,44	24,33	0,58	2,37
Mn	3,00	0,17	5,67	0,38	4,03	0,35	8,71	3,23	0,61	2,43	0,06	2,47	5,43	0,35	6,46
Zn	3,03	0,21	6,93	0,12	3,70	0,26	7,15	3,13	0,67	3,10	0,17	5,48	3,53	0,15	4,32
CTC ef	3,56	0,32	8,99	0,16	2,03	0,07	3,35	4,34	0,55	3,42	0,49	14,33	2,93	0,15	5,25
CTC a pH 7	4,83	0,40	8,28	0,21	3,36	0,05	1,41	5,27	0,59	4,32	0,49	11,34	3,96	0,20	5,05
V	74,00	1,73	2,34	69,33	60,67	1,53	2,52	82,00	1,73	79,00	2,65	3,35	74,00	1,00	1,35
m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

CaCl₂.2H₂O, 0,01 Mol L⁻¹; P, K, Na = Mehlich 1; S-SO₄⁻² = [fosfato monobásico de cálcio 0,01 mol L⁻¹]; Ca, Mg, Al, [KCl 1 mol L⁻¹]; H + Al = [Solução tampão SMP a pH 7,5]; MO = matéria orgânica; CO, carbono orgânico; Análise de textura = método pipeta/densímetro. B = água quente; Cu, Fe, Mn, Zn = [DTPA]; μ = média, σ = desvio padrão, CV (%) = coeficiente de variação.

Tabela 6. Teores de nutrientes nas plantas de *Solanum lycopersicum* L. no tratamento controle e com biocarvão a 2% (v/v) (segundo experimento).

Determinação	Ideal*	Controle	Biocarvão a 2%
N	45,9	31	30,8
P	5,6	4	6
K	57,2	37,6	44,4
Ca g kg ⁻¹	44	18,2	13,4
Mg	5	5,9	5,1
S	**	9,3	6,8
Na	**	9,4	11,4
B	**	28	43
Cu	40	7	9
Fe mg kg ⁻¹	268	289	605
Mn	290	46	34
Zn	37	16	24

*Faixa ótima de referência para os nutrientes listados, conforme a norma estabelecida e disposta em Ribeiro et al. (1999). **Sem valores de referência. N: (LQ: 0,6 g kg⁻¹) – digestão sulfúrica. Na: digestão nitroperclórica. P: (LQ: 0,01 g kg⁻¹). K: (LQ: 0,3 g kg⁻¹). Ca: (LQ: 0,1 g kg⁻¹). Mg: (LQ: 0,01 g kg⁻¹). S: (LQ: 0,04 g kg⁻¹). Cu: (LQ: 2 mg kg⁻¹). Fe: (LQ: 2 mg kg⁻¹). Mn: (LQ: 3 mg kg⁻¹). Zn: (LQ: 0,6 mg kg⁻¹) digestão nitroperclórica. B: (LQ: 0,04 mg kg⁻¹) – digestão por via seca.

Fonte: Malavolta et al. (1997).

Por fim, o teor de Ca na parte aérea das plantas cultivadas foi menor nos experimentos com altas taxas de Na.

Com base nas informações disponíveis na literatura, nas taxas de mortalidade das plantas cultivadas às quais o biocarvão foi acrescido, nos resultados das análises dos substratos e tecidos, nas medições de área foliar, nas taxas de fotossíntese e nos fatores relacionados à produtividade, uma das possibilidades é que o biocarvão produzido tenha apresentado teores de Na elevados, o que teria inviabilizado sua utilização no plantio de *S. lycopersicum* L. Será necessário, em pesquisas futuras, considerar a salinidade dos corpos hídricos onde serão instalados os SACs, que são a fonte dos resíduos vegetais que servirão como matéria-prima. Uma outra linha possível é o teste do biocarvão produzido em outros vegetais. As respostas ao estresse salino variam amplamente de acordo com cada espécie (Willadino; Camara, 2010).

Acúmulo de carbono

Os teores de carbono orgânico total (TOC) determinados no biocarvão produzido, nas amostras processadas de *Typha domingensis* Pers.

e no substrato utilizado no cultivo dos tomateiros sugerem que a introdução do biocarvão constitui uma estratégia viável para o sequestro de carbono em forma estável no solo. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados das análises de carbono orgânico total (TOC) feitas nas amostras de taboa, no biocarvão produzido e nos substratos utilizados no cultivo de *Solanum lycopersicum* L. (segundo experimento).

Amostra	μ	σ	CV (%)
Taboa processada	40,3592	1,002	0,248
Biocarvão	66,7385	1,006	0,151
Controle em 12/10/22	0,2937	0,092	3,140
Biocarvão em 12/10/22	1,1701	0,033	0,285
Controle em 7/2/23	0,1802	0,036	1,970
Biocarvão em 7/2/23	1,0698	1,094	10,230

Carbono orgânico total: resultado das médias expresso em percentual massa/massa de carbono por total de amostra, determinado conforme Jing et al. (2020). Controle: areia e argila (1/1) + CaCO₃ + NPK 4-14-8. Biocarvão a 2%: areia e argila (1/1) + CaCO₃ + NPK 4-14-8 + biocarvão produzido a partir de *Typha domingensis* Pers., acrescido na proporção de 2% (v/v) do total. Amostragens feitas no substrato utilizado no segundo experimento. μ , média. σ , desvio-padrão, CV (%), coeficiente de variação.

A concentração de carbono aumentou de aproximadamente 40,359% do total da matéria seca de *Typha domingensis* Pers. para 66,738% no biocarvão, através do processo de pirólise lenta (Sousa, 2015; Alkharabsheh et al., 2021). A quantidade de carbono total no substrato acrescido com biocarvão aumentou significativamente ($p < 0,05$) em relação ao controle, resultado que se mostrou consistente em ambas as medições realizadas. O rendimento do processo foi de aproximadamente 37,8% a partir da matéria-prima processada. Não foi quantificado neste estudo o percentual de gases como gás carbônico e metano, que foram liberados durante a pirólise. Vale ressaltar que a maior parte da perda de massa através da degradação térmica promovida pelo processo consiste em água (Alkharabsheh et al., 2021; Lehmann et al., 2021).

Na literatura, estão disponíveis diversos trabalhos que mostram que o uso conjugado de fertilizantes químicos e biocarvão promove o acréscimo de carbono recalcitrante ao solo (Chen et al., 2011; Wang et al., 2020; Alkharabsheh et al., 2021; Lehmann et al., 2021). O quantitativo diminuiu gradualmente durante o tempo de cultivo dos tomates, em ambas as dosagens, o que indica a mineralização parcial do elemento por microrganismos e a consequente

formação de gases como o CO₂. Considerando os teores de carbono no tratamento controle, foi constatado que aproximadamente 38,65% do quantitativo de carbono inicial foi mineralizado. Já no tratamento com biocarvão a 2% (v/v), a mineralização foi significativamente menor, de 8,57%.

Segundo Lehmann et al. (2021), a utilização de biocarvão contribui no combate ao efeito estufa de formas distintas: redução na mineralização de carbono e conseqüente redução nas emissões de CO₂, em comparação com as emissões por matéria-prima não pirolisada; mudanças nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs) após o biocarvão ser acrescido ao substrato, proporcionadas pelo aumento do crescimento das plantas; mudanças provocadas por reduções nas taxas de mineralização do carbono já presente no solo. Yang et al. (2021) atestaram a viabilidade econômica do uso de biocarvão e identificaram três pontos críticos: o consumo de energia pelo processo de pirólise, a eficiência no aproveitamento do bio-óleo e biogás produzidos na geração de eletricidade, e os benefícios na agricultura promovidos pelo biocarvão. Os autores ressaltam outras possíveis contribuições na mitigação de questões ambientais, promovidas pela utilização do biocarvão em larga escala, como reduzir o atual ritmo de destruição da biodiversidade aquática marinha e mitigar o processo de acidificação de solos e reservas de água doce.

Conclusão

O estudo realizado sobre a aplicação do biocarvão produzido a partir de *Typha domingensis* Pers. (taboa) evidenciou resultados positivos quanto ao sequestro de carbono resistente à mineralização no solo e ao incremento da fertilidade desse recurso. Quanto à produtividade de *Solanum lycopersicum* L., os ensaios indicaram que, apesar do aumento dos teores de nutrientes, como fósforo e potássio, o quantitativo de sódio no biocarvão pode ter interferido negativamente no desenvolvimento das plantas. É possível que a taboa coletada em lagoas costeiras não constitua matéria-prima adequada para a produção do biocarvão a ser utilizado no cultivo de tomate. Os dados sugerem que a salinidade advinda desse elemento prejudicou a sobrevivência e a produtividade dos tomateiros. Sugere-se a continuidade da pesquisa, considerando o contexto salino dos ambientes aquáticos onde as matérias-primas são coletadas e testes com outras plantas mais tolerantes à salinidade. A mineralização do

carbono demonstrou ser compatível com a literatura, indicando que a utilização do biocarvão produzido poderia contribuir para o acúmulo de carbono no solo, embora haja a necessidade de aprimoramento na escolha de matérias-primas, pontos de amostragem, processamento e metodologias de pirólise. Dessa forma, futuras investigações podem estabelecer estratégias mais efetivas para a utilização do biocarvão oriundo de macrófitas aquáticas na agricultura sustentável.

Agradecimentos

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio financeiro. A Aline Monteiro, Bruno Forte, Luís Prado, Enoque Yue, Luís Felisberto, Valéria Botelho, Aline Lemos, Leonardo Esteves, e a todos que prestaram auxílio em alguma etapa da pesquisa.

Referências

- ABBOUD, A. C. S. **Introdução à agronomia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2013. 644 p.
- AGUILAR-CHÁVEZ, Á.; DÍAZ-ROJAS, M.; CÁRDENAS-AQUINO, M. DEL R.; DENDOOVEN, L.; LUNA-GUIDO, M. Greenhouse gas emissions from a wastewater sludge-amended soil cultivated with wheat (*Triticum* spp. L) as affected by different application rates of charcoal. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 52, p. 90-95, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.022>.
- ALKHARABSHEH, H. M.; SELEIMAN, M. F.; BATTAGLIA, M.; SHAMI, A.; JALAL, R. S.; ALHAMMAD, B. A.; AL-SAIF, A. M. Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: a review. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 993, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>.
- ARIE, T.; TAKAHASHI, H.; KODAMA, M.; TERAOKA, T. Tomato as a model plant for plant-pathogen interactions. **Plant Biotechnology**, Tokyo, v. 24, p. 135-147, 2007.
- ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crops Research**, v. 111, n. 1-2, p. 81-84, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008>.
- BAI, S. H.; FARRAR, M. B.; GALLART, M.; REVERCHON, F.; TAHERYMOOSAVI, S.; OMIDVAR, N.; KICHAMU-WACHIRA, E.; JOSEPH, S. Biochar effects on nutrient leaching. In: LEHMMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management science, technology and implementation**. 3. ed.

London: Routledge, 2024. 902 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003297673>.

BILIAS, F.; KALDERIS, D.; RICHARDSON, C.; BARBAYIANNIS, N.; GASPARATOS, D. Biochar application as a soil potassium management strategy: a review. **Science of the Total Environment**, v. 858, part 1, 159782, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159782>.

BORCHARD, N.; SCHIRRMANN, M.; CAYUELA, M. L.; KAMMANN, C.; WRAGE-MÖNNIG, N.; ESTAVILLO, J. M.; FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; SIGUA, G.; SPOKA, K.; IPPOLITO, J. A.; NOVAK, J. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: a meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 651, part 2, p. 2354-2364, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>.

BUDAI, A.; ZIMMERMAN, A. R.; COWIE, A. L.; WEBBER, J. B. W.; SINGH, B. P.; GLASER, B.; MASIELLO, C. A.; ANDERSSON, D.; SHIELDS, F.; LEHMANN, J.; ARBESTAIN, M. C.; WILLIAMS, M.; SOHI, S.; JOSEPH, S. Biochar carbon stability test method: an assessment of methods to determine biochar carbon stability. **International Biochar Initiative**, p. 1-20, 2013. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/06/IBI_Report_Biochar_Stability_Test_Method_Final.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.

CAMPOSTRINI, E. **Fluorescência da clorofila**: considerações teóricas e aplicações práticas. Campos dos Goytacazes, RJ: UFNF, 2001. 33 p.

CHEN, H. X.; DU, Z. L.; GUO, W.; ZHANG, Q. Z. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain. **Ying Yong Sheng Tai Xue Bao**, v. 22, n. 11, 2930-4. 2011.

CÓRDOVA, M. O.; KEFFER, J. F.; GIACOPPINI, D. R.; POTT, V. J.; POTT, A.; MOURA JÚNIOR, E. G. DE; MUNHOZ, C. B. R. Aquatic macrophytes in southern Amazonia, Brazil: richness, endemism, and comparative floristics. **Wetlands**, v. 42, n. 27, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01545-7>.

CUARTERO, J.; FERNÁNDEZ-MUÑOZ, R. Tomato and salinity. **Scientia Horticulturae**, v. 78, n. 1-4, p. 83-125, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00191-5).

CUI, X.; HAO, H.; HE, Z.; STOFFELLA, P. J.; YANG, X. Pyrolysis of wetland biomass waste: potential for carbon sequestration and water remediation. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 95-104, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.049>.

DEENIK, J. L.; MCCLELLAN, T.; UEHARA, G.; ANTAL, M. J.; CAMPBELL, S. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n.

4, p. 1259-1270, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0115>.

DELUCA, T. H.; GUNDALE, M. J.; MACKENZIE, M. D.; JONES, D. L. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management**: science, technology implementation. 3. ed. London: Routledge, 2024. 976 p.

DILSHAD, R.; KHAN, K. U.; SAEED, L.; SHERIF, A. E.; AHMAD, S.; OVATLARNPORN, C.; NASIM, J.; HUSSAIN, M.; GHALLOO, B. A.; BASIT, A.; MUKHTAR, I. Chemical composition and biological evaluation of *Typha domingensis* Pers. to ameliorate health pathologies: in vitro and in silico approaches. **BioMed Research International**, v. 14, 2022. DOI: [10.1155/2022/8010395](https://doi.org/10.1155/2022/8010395).

DIOUF, G.; GNING, P. B. Influence of the extraction process on the mechanical and morphological properties of technical fibers from *Typha domingensis*. **Journal of Natural Fibers**, v. 21, n. 1, 2357744, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2357744>.

EL-NAGGAR, A.; LEE, S. S.; AWAD, Y. M.; YANG, X.; RYU, C.; RIZWAN, M.; RINKLEBE, J.; TSANG, D. C. W.; OK, Y. S. Influence of soil properties and feedstocks on biochar potential for carbon mineralization and improvement of infertile soils. **Geoderma**, v. 332, p. 100-108, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.017>.

ESTEVEZ, F. A. Lagoa Imboassica: impactos antrópicos, propostas mitigadoras e sua importância para a pesquisa ecológica. In: ESTEVES, F. A. (ed.) **Ecologia de lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do município de Macaé**. Macaé: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. p. 401-430.

FARIAS, R. N. de. **De campo a cidade: urbanização e eutrofização artificial de um ecossistema aquático costeiro (Lagoa Imboassica, RJ)**. 2018. 144 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Conservação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé.

GAO, S.; DELUCA, T. H.; CLEVELAND, C. C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: a meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 463-472, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>.

GAO, X.; MASIELLO, C. A. Biochar effects on water availability. In: LEHMMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management science, technology and implementation**. 3. ed. London: Routledge, 2024. 902 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003297673>.

GASKIN, J. W.; SPEIR, R. A.; HARRIS, K.; DAS, K. C.; LEE, R. D.; MORRIS, L. A.; FISHER, D. S. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. **Agronomy Journal**, v. 102,

n. 2, p. 623-633, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0083>.

GLASER, B.; WIEDNER, K.; SEELIG, S.; SCHMIDT, H. P.; GERBER, H. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 667-678, 2015.

GODWIN-EGEIN, M. I.; UDENSI, U. K.; OMOVBUDE, S. Managing Nigeria's Aquatic Resources. In: NDIMELE, P. E. (ed). **The political ecology of oil and gas activities in the Nigerian aquatic ecosystem**. Lagos, NI: Academic Press, 2018. p. 199-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809399-3.00015-X>.

GUIMARÃES, R. de S.; PADILHA, F. J.; CEDANO, J. C.; DAMACENO, J. B.; GAMA, R. T.; OLIVEIRA, D. M. de; TEIXEIRA, W. G.; FALCÃO, N. P. de S. Efeito residual de biocarvão e pó de serra nos teores de carbono e nitrogênio total em Latossolo Amarelo na Amazônia. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 9, n. 5, p. 1944-1956, set./out. 2017.

HOFFMANN, J.; BERNI, R.; SUTERA, F. M.; GUTSCH, A.; HAUSMAN, J. F.; SAFFIE-SIEBERT, S.; GUERRIERO, G. The effects of salinity on the anatomy and gene expression patterns in leaflets of tomato cv. Micro-Tom. **Genes**, v. 12, n. 8, p. 1165, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes12081165>.

HUSSAIN, M.; FAROOQ, M.; NAWAZ, A.; AL-SADI, A. M.; SOLAIMAN, Z. M.; ALGHAMDI, S. S.; AMMARA, U.; OK, Y. S.; SIDDIQUE, K. H. M. Biochar for crop production: potential benefits and risks. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 685-716, 2017.

HUGUET-MARQUES, M. C. ***Typha domingensis* Pers. (Typhaceae): do artesanato à fitorremediação de ambientes aquáticos continentais eutrofizados**. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; ABALOS, D.; BASTOS, A. C. Plant productivity with biochar applications to soils. In: LEHMMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation**. 3. ed. London: Routledge, 2024. 902 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003297673>.

JIN, Z.; CHEN, C.; CHEN, X.; JIANG, F.; HOPKINS, I.; ZHANG, X.; HAN, Z.; BILLY, G.; BENAVIDES, J. Soil acidity, available phosphorus content, and optimal biochar and nitrogen fertilizer application rates: a five-year field trial in upland red soil, China. **Field Crops Research**, v. 232, p. 77-87, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.12.013>.

JING, Y.; ZHANG, Y.; HAN, I.; WANG, P.; MEI, Q.; HUANG, Y. Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil. **Scientific Reports**,

v. 10, 8837, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65796-2>.

IDOWU, M. K.; ADUAYI, E. A. Sodium-potassium interaction on growth, yield and quality of tomato in Ultisol. **Journal of Plant Interactions**, v. 2, n. 4, p. 263-271, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/17429140701713803>.

KHIDER, T. O.; OMER, S.; TAHA, O. Alkaline Pulping of *Typha domingensis* Stems from Sudan. **World Applied Sciences Journal**, v. 16, n. 3, p. 331-336, 2012.

KIMETU, J. M.; LEHMANN, J.; NGOZE, S. O.; MUGENDI, D. N.; KINYANGI, J. M.; RIHA, S.; VERCHOT, L.; RECHA, J. W.; PELL, A. N. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. **Ecosystems**, v. 11, p. 726-739, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9154-z>.

LAGHARI, M.; MIRJAT, M. S.; HU, Z.; FAZAL, S.; XIAO, B.; HU, M.; CHEN, Z.; GUO, D. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. **Catena**, v. 135, p. 313-320, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.013>.

LEHMANN, J.; COWIE, A.; MASIELLO, C. A.; KAMMANN, C.; WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; CAYUELA, M. L.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; WHITMAN, T. Biochar in climate change mitigation. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 12, p. 883-892, 2021.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management. In: LEHMMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management science, technology and implementation**. 3. ed. London: Routledge, 2024. 902 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003297673>.

LESIV, M. S.; POLISHCHUK, A. I.; ANTONYAK, H. K. Aquatic macrophytes: ecological features and functions. **Biologichni Studii**, v. 14, n. 2, p. 79-94, 2020. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.1402.619>.

LUZ, A. G. DA; BLENINGER, T. B.; POLLI, B. A.; LIPSKI, B. A. Spatio-temporal variation of aquatic macrophyte cover in a reservoir using Landsat images and Google Earth Engine. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, p. e37, 2022.

MAJOR, J.; LEHMANN, J.; RONDON, M.; GOODALE, C. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. **Global Change Biology**, v. 16, p. 1366-1379, 2010. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2009.02044.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02044.x).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MARQUES, M. C. H.; SANTOS, I. S. DOS; LEAL, G. F.; FIGUEIREDO-BARROS, M. P. *Typha domingensis*

- Pers. (Typhaceae): do artesanato à fitorremediação de ambientes aquáticos continentais e eutrofizados. In: PAES-FERREIRA, M. I.; BARRETO, G. S.; LUGON JUNIOR, J.; SILVA, J. A. F.; BARROS, M. P. F. (org.). **Engenharia & Ciências Ambientais**: contribuições à gestão ecossistêmica. p. 88-115. Macaé, RJ: Essentia Editora, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19180/978-85-99968-58-1.5>.
- MEIRELLES-PEREIRA, F.; ESTEVES, F. A. Eutrofização artificial. In: ESTEVES, F. A. (coord.). **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 625-655.
- MIZRAHI, Y.; TALEISNIK, E.; KAGAN-ZUR, V.; ZOHAR, Y.; OFFENBACH, R.; MATAN, E.; GOLAN, R. A saline irrigation regime for improving tomato fruit quality without reducing yield. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 113, n. 2, p. 202-205, 1988. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS.113.2.202>.
- MOHANTY, A. K.; VIVEKANANDHAN, S. DAS, O.; MILLÁN, L. M. R.; KLINGHOFFER, N. B.; NZIHO, A.; MISRA, M. Biocarbon materials. **Nature Reviews Methods Primers**, v. 4, n. 19, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43586-024-00297-4>.
- MOSHARROF, M.; UDDIN, M.; JUSOP, S.; SULAIMAN, M. F.; SHAMSUZZAMAN, S. M.; HAQUE, A. N. Integrated use of biochar and lime as a tool to improve maize yield and mitigate CO₂ emission: A review. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 81, n. 1, p. 109-118, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392021000100109>.
- MUKHERJEE, A.; LAL, R. The biochar dilemma. **Soil research**, v. 52, n. 3, p. 217-230, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR13359>.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (ed.). **Methods of soil analysis**: part 3 chemical methods. ACSESS, 1996. p. 961-1010.
- NETTO, A. T.; CAMPOSTRINI, E.; DE ASSIS GOMES, M. M. Efeitos do confinamento radicular nas medidas biométricas e assimilação de CO₂ em plantas de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 12, n. 3, p. 295-303, 2006.
- NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009. DOI: [10.1097/SS.0b013e3181981d9a](https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181981d9a).
- NZANZA, B.; MARAIS, D.; SOUNDY, P. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and biochar amendment on growth and yield of tomato. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 14, n. 6, p. 965-969, 2012.
- PANOSSO, R. F.; ATTAYDE, J. L.; DIETER, M. Morfometria das lagoas Imboassica, Cabiúnas, Comprida e Carapebus: implicações para seu funcionamento e manejo. In: ESTEVES, F. A. (ed.). **Ecologia de lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé**. Macaé: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. p. 91-108.
- PETROVA, V.; YORDANOVA, M. The influence of biocarbon on the availability of soil nutrients during zucchini cultivation. **Scientific Papers. Series A. Agronomy**, v. 63, n. 1, p. 119-124, 2020.
- PFISTER, M.; SAHA, S. Effects of biochar and fertilizer management on sunflower (*Helianthus annuus* L.) feedstock and soil properties. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, n. 5, p. 651-662, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1228894>.
- POMPÊO, M. L. M. **Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas em reservatórios tropicais brasileiros**. São Paulo: Instituto de Biociências da USP, 2017. 138 p.
- POORMANSOUR, S.; RAZZAGHI, F.; SEPASKHAH, A. R. Wheat straw biochar increases potassium concentration, root density, and yield of faba bean in a sandy loam soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 15, p. 1799-1810, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1635145>.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.
- RØRSLETT, B.; MJELDE, M.; JOHANSEN, S. W. Effects of hydropower development on aquatic macrophytes in Norwegian rivers: present state of knowledge and some case studies. **River Research and Applications**, v. 3, n. 1, p. 19-28. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1002/rrr.3450030104>.
- ROUSK, J.; BÅÅTH, E.; BROOKES, P. C.; LAUBER, C. L.; LOZUPONE, C.; CAPORASO, J. G.; KNIGHT, R.; FIERER, N. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. **ISME**, v. 4, n. 10, p. 1340-1351, 2010.
- SANTOS, A. M. D.; AMADO, A. M.; MINELLO, M.; FARJALLA, V. F.; ESTEVES, F. A. Effects of the sand bar breaching on *Typha domingensis* (Pers.) in a tropical coastal lagoon. **Hydrobiologia**, v. 556, p. 61-68, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1084-6>.
- SANTOS, K. **Influência de diferentes substratos no crescimento inicial de mudas de alface**. 19 f. 2019. Monografia (Conclusão de curso) - Instituto Federal Goiano, Urutaí.

- SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>.
- SCOTT, J. W.; HARBAUGH, B. K. **Micro-Tom**: a miniature dwarf tomato. Gainesville: Agricultural Experiment Station, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1989. 5 p. DOI: cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19911620313.
- SOUSA, A. A. T. C. de. **Biochar de lodo de esgoto**: efeitos no solo e na planta no cultivo de rabanete. 63 f. 2015. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/17926/1/2015_AlexAntonioTorresCortesSousa.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.
- SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 32, n. 2, p. 127-138, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/01448765.2015.1093545>.
- SUTHAR, R. G.; WANG, C.; NUNES, M. C. N.; CHEN, J.; SARGENT, S. A.; BUCKLIN, R. A.; GAO, B. Bamboo biochar pyrolyzed at low temperature improves tomato plant growth and fruit quality. **Agriculture**, v. 8, n. 10, p. 153, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture8100153>.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.
- THIES, J. E.; DOMENE, X.; JOSEPH, S.; RONG, X.; LEHMANN, J. Biochar effects on the abundance, activity, and diversity of the soil biota. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation**. 3. ed. London: Routledge, 2024. 902 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003297673>.
- THOMAZ, S. M.; ESTEVES, F. DE A. Comunidade de macrófitas aquáticas. In: ESTEVES, F. A. (coord.). **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 461-521
- UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2015.
- WANG, D.; JIANG, P.; ZHANG, H.; YUAN, W. Biochar production and applications in agro and forestry systems: a review. **Science of the Total Environment**, v. 723, 137775, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775>.
- WANG, F.; WANG, X.; SONG, N. 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**, v. 315, 107425, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107425>.
- WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-23, 2010.
- WU, H.; QI, Y.; DONG, L.; ZHAO, X.; LIU, H. Revealing the impact of pyrolysis temperature on dissolved organic matter released from the biochar prepared from *Typha orientalis*. **Chemosphere**, v. 228, p. 264-270, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.143>.
- XIAO, R.; WANG, J. J.; GASTON, L. A.; ZHOU, B.; PARK, J. H.; LI, R.; DODLA, S. K.; ZHANG, Z. Biochar produced from mineral salt-impregnated chicken manure: fertility properties and potential for carbon sequestration. **Waste Management**, v. 78, p. 802-810, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.047>.
- YANG, Q.; MAŠEK, O.; ZHAO, L.; NAN, H.; YU, S.; YIN, J.; LI, Z.; CAO, X. Country-level potential of carbon sequestration and environmental benefits by utilizing crop residues for biochar implementation. **Applied Energy**, v. 282, part B, 116275, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116275>.
- YU, H.; ZOU, W.; CHEN, J.; CHEN, H.; YU, Z.; HUANG, J.; TANG, H.; WEI, X.; GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 8-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117>.
- ZELAYA, K. P. S. **Caracterização de biocarvão de lodo de esgoto e bagaço de cana-de-açúcar e efeitos no cultivo de beterraba**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA
E PECUÁRIA