

BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO EM SOLO DEGRADADO: EFEITOS NAS TROCAS GASOSAS DE PLANTAS DE MILHO

Francisca Gleiciane da Silva¹, Ícaro Vasconcelos do Nascimento², José Lucas Martins Melo³, Rafael Santiago da Costa⁴, Jaedson Cláudio Anunciato Mota⁵, Mirian Cristina Gomes Costa⁶

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de biocarvões obtidos a partir de lodo de esgoto adicionado de poda de caju (BLP) e de bagaço de caju (BBC) na fisiologia do milho cultivado em solo degradado. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em delineamento inteiramente aleatorizado, utilizando colunas preenchidas com Planossolo de núcleo de desertificação de Irauçuba-CE. Os tratamentos consistiram na aplicação de doses de 0, 5, 10, 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹ dos biocarvões, em esquema fatorial 2 × 4 + 1 (dois tipos de biocarvões, quatro doses e um tratamento controle). Foi avaliado a taxa fotossintética líquida (An), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), taxa de transpiração (Tr) e eficiência intrínseca do uso da água (EUAint). O BLP promoveu aumento significativo da EUAint com a elevação das doses, ajustando-se a modelo linear ($R^2 = 0,78$), além de reduzir gs em todas as doses testadas. O BBC apresentou menor efeito sobre a EUAint, mas contribuiu para valores de gs e An semelhantes aos do controle. As taxas de An e Tr não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, sugerindo manutenção do potencial fotossintético. Conclui-se que o BLP tem maior potencial em melhorar a eficiência do uso da água, enquanto o BBC favorece estabilidade fisiológica das plantas em solo degradado.

PALAVRAS-CHAVE: ecofisiologia, condicionador de solo, co-pirólise

¹ Pesquisadora – pós-doutorado – Universidade Federal do Ceará Federal - Ceará (UFC), Departamento de Ciências do Solo- 2977, Av. Mister Hull, Campus do Pici, 60356-001, Fortaleza – CE. e-mail: Fone: (85) 3366 9686 gleicianei.silva27@gmail.com

² Pesquisador – pós-doutorado – Depto de Ciências do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

³ Doutorando – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo - Depto de Ciências do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

⁴ Companhia de Água e Esgoto do Ceará, Vila União, 60.422-901, Fortaleza - CE, Brasil.

⁵ Profa. Doutor. Depto de Ciências do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

⁶ Profa. Doutor. Depto de Ciências do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

BIOCHAR IN DEGRADED SOIL: EFFECTS ON GAS EXCHANGE IN MAIZE PLANTS

ABSTRACT: This study aimed to evaluate the effects of biochars produced from the co-pyrolysis of sewage sludge with cashew pruning residues (BLP) and from the pyrolysis of cashew bagasse (BBC) on the physiology of maize grown in degraded soil. The experiment was carried out in a greenhouse under a completely randomized design, using a Planosol from the desertification core of Irauçuba, Ceará, Brazil. Treatments consisted of the application of 0, 5, 10, 20, 30, and 40 Mg ha⁻¹ of biochar in a 2 × 4 + 1 factorial scheme (two types of biochar, four doses, and a control). The net photosynthetic rate (An), stomatal conductance (gs), internal CO₂ concentration (Ci), transpiration rate (Tr), and intrinsic water use efficiency (WUEi) were evaluated. BLP significantly increased WUEi with increasing doses, following a linear model (R² = 0.78), and reduced gs at all tested doses. BBC had a smaller effect on WUEi but resulted in gs and An values like the control. Photosynthetic and transpiration rates showed no significant differences among treatments, indicating maintenance of photosynthetic potential. It was concluded that BLP has greater potential to improve water use efficiency, whereas BBC supports the physiological stability of maize in degraded soil.

KEYWORDS: ecophysiology, soil conditioner, co-pyrolysis

INTRODUÇÃO

A degradação do solo avança em escala global, impulsionada por práticas intensivas e prolongadas, como o desmatamento, agricultura extensiva e o sobrepastoreio (ARAUJO et al., 2024; DIXIT et al., 2024). Como consequência, ocorre perda do potencial produtivo do solo e dos serviços ecossistêmicos essenciais, como a ciclagem de água e nutrientes — fundamentais ao crescimento e desenvolvimento das plantas (DERPSCH et al., 2024). A combinação de solos frágeis com períodos curtos de chuvas intensas, característica da região semiárida do Brasil, torna essas áreas especialmente vulneráveis à degradação, sobretudo em função da ação antrópica (ARAUJO et al., 2024; MONIZ et al., 2025). Diante desse cenário, é urgente reverter a degradação e com isso restaurar a produtividade do solo e suas funções ecológicas (DI SANTO et al., 2025). Nas últimas décadas, o uso de biocarvão — um material rico em carbono estável, com alta área superficial, porosidade e presença de grupos funcionais oxigenados (MONIZ et al., 2025) — tem se destacado como uma estratégia promissora para melhorar as

propriedades de solos degradados. A produção de biocarvões ocorre por pirólise ou co-pirólise, processos termoquímicos que transformam biomassa sob condições de limitação ou ausência de oxigênio (CAO et al., 2024; FAN et al., 2023). A co-pirólise combina diferentes biomassas para aprimorar características do biocarvão como área superficial, porosidade e biodisponibilidade de nutrientes, além de reduzir o teor de cinzas e a toxicidade, quando comparada à pirólise convencional (CHEN et al., 2020). Embora ambos os tipos de biocarvão apresentem potencial para melhorar a qualidade do solo e favorecer o desenvolvimento vegetal, seus efeitos sobre as trocas gasosas em solos degradados ainda são pouco explorados. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de biocarvões produzidos pela co-pirólise de lodo de esgoto com poda de caju (BLP) e pela pirólise de bagaço de caju (BBC) na fisiologia do milho cultivado em solo degradado. As hipóteses foram: (1) a adição de biocarvões melhora as trocas gasosas das plantas; (2) o BLP, por apresentar maior funcionalidade, exerce efeito mais expressivo; e (3) os impactos variam conforme a dose aplicada.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em casa de vegetação no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza-CE, Brasil (3°44'34.87'' S, 38°34'31.34'' W), entre agosto e outubro de 2023. O clima local é Aw (tropical chuvoso, segundo Köppen). Durante o experimento, a temperatura foi mantida entre 27 e 35 °C e a umidade relativa do ar foi de cerca de 80%. O solo utilizado foi coletado na Fazenda Aroeira, em Irauçuba-CE (3°44'46'' S, 39°47'00'' W), área incluída no projeto “Estudos dos processos de Degradação/Desertificação e suas relações com o uso da terra em sistemas de produção do semiárido cearense”. Classificado como Planossolo, o solo apresenta textura franco-arenosa (760 g kg⁻¹ areia, 117 g kg⁻¹ silte e 70 g kg⁻¹ argila) e os seguintes atributos químicos: pH (H₂O) 5,1; CE 0,03 dS m⁻¹; 8,44 mg kg⁻¹ P; 6,07 g kg⁻¹ Corg; Na⁺ 0,08; Ca²⁺ 6,97; Mg²⁺ 0,46; K⁺ 0,09; Al³⁺ 0,54; H⁺ + Al³⁺ 2,52 cmolc kg⁻¹; SB 7,52; V% 29,74; CTC 10,49 cmolc kg⁻¹. O delineamento foi inteiramente aleatorizado, em esquema fatorial (2 × 4) + 1, com quatro repetições (36 unidades experimentais). Os tratamentos consistiram em dois biocarvões: BLP (co-pirólise de lodo de esgoto com poda de caju 1:1 (m/m); e BBC (pirólise de bagaço de caju), aplicados em doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹, além do tratamento controle. As unidades experimentais foram colunas de PVC (20 cm diâmetro e 50 cm altura), preenchidas com material de solo seco ao ar e peneirado (4 mm), misturado às doses de biocarvão, considerando

densidade de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$. O BLP e o BBC foram produzidos por carbonização pirolítica a $500 \pm 4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 190 min, em fluxo moderado de N_2 . As propriedades dos biocarvões estão apresentadas em MONIZ et al. (2025). As colunas de solo foram incubadas por 30 dias, mantendo umidade entre capacidade de campo e 70% da CAD (calculada entre -10 e -1500 kPa). Após esse período, três sementes de milho foram semeadas, e posteriormente foi mantida a planta mais vigorosa. A fertilização seguiu o Manual de Adubação do Ceará. Aos 60 dias após a emergência, as trocas gasosas: transpiração (Tr), condutância estomática (gs) e taxa fotossintética (An) foram avaliadas com IRGA (LCI BioScientific), sob luz artificial de $1700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no terço médio da terceira folha totalmente expandida de cada planta. Os dados obtidos foram submetidos a ANOVA, testes de Dunnett e Tukey ($p < 0,05$), e ajustes de regressão linear e quadrática com SAS® OnDemand for Academics.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de biocarvão e das doses afetou significativamente a condutância estomática (gs) (Figura 1c,g), enquanto as doses também influenciaram a eficiência intrínseca do uso da água (EUAint) (Figura 1d,h). Foi identificado interação significativa entre tipo de biocarvão e dose para gs (Figura 1c). A fotossíntese (An) e a transpiração (Tr) não diferiram entre os tratamentos, mas apresentaram ajustes significativos aos modelos testados em função das doses (Figura 1a,b). Para a An, o BBC seguiu ajuste quadrático, com valor médio estimado de $23,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na dose de 23 Mg ha^{-1} , representando aumento de 22% até 40 Mg ha^{-1} (Figuras 1b). O BLP apresentou ajuste linear negativo, com redução de 2% da dose 0 até 40 Mg ha^{-1} . Para Tr, o BLP promoveu redução de 23,4% da menor para a maior dose (Figura 1b). A gs variou significativamente entre doses e tipos de biocarvão (Figura 1c,g). O BBC10 apresentou o maior gs ($6,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), seguido do controle e BBC40; o BLP apresentou o menor gs ($1,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 1c). A redução na gs pelo BLP indica maior fechamento estomático, limitando o influxo de CO_2 (TAIZ et al., 2017). Este comportamento pode estar associado às características do BLP, como menor área superficial e menor adsorção de água (MONIZ et al., 2025). Por outro lado, o BBC, em doses moderadas, contribuiu para maior retenção de água, o que pode estar associado a suas propriedades hidrofílicas que permitem maior ligação com hidrogênio e com isso maior retenção de água (MONIZ et al., 2025). A EUAint variou com as doses (Figura 1d,h). O BLP40 apresentou o maior valor, com aumento de 365% em relação ao controle, enquanto o BBC não diferiu do controle (Figura 1d).

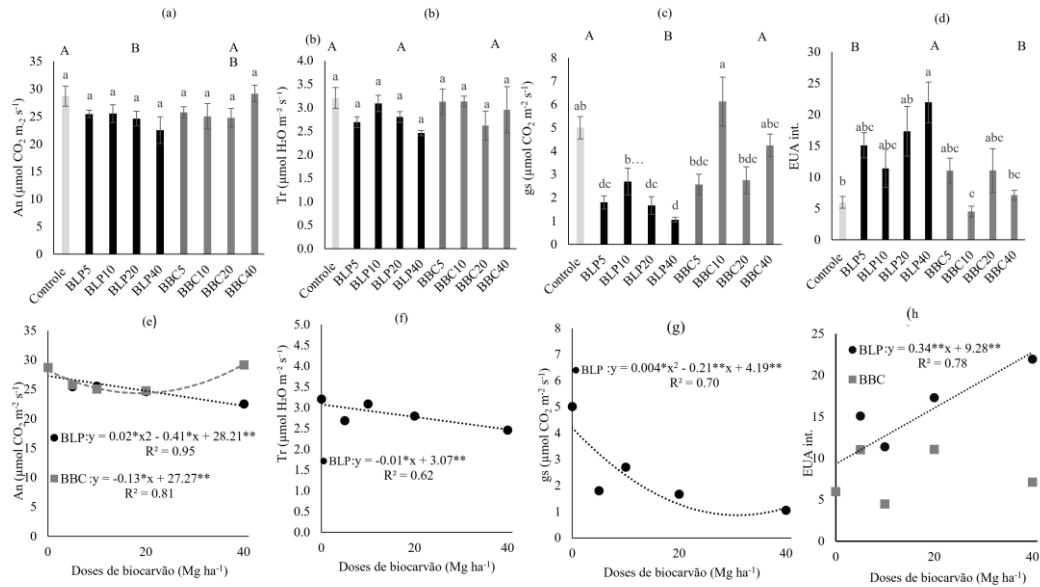


Figura 1. Medias para trocas gasosas e eficiência intrínseca do uso da água para os tratamentos de biocarvão de lodo com poda de caju (BLP) e de bagaço de caju (BBC), e regressões. Letras minúsculas: diferenças entre doses (Tukey, $p < 0,05$); maiúsculas: comparação entre grupos (controle, BLP, BBC). Barras: erro padrão. **Significativo a 1%

O gs com BLP foi até 78% inferior na dose de 40 Mg ha⁻¹ em relação ao controle (Tabela 1), enquanto a para a EUAint BLP20 e BLP40 foi superior ao controle (Tabela 1). Esse resultado indica que o BLP permitiu maior eficiência no uso da água ao manter a fotossíntese com menor abertura estomática, reduzindo a perda por transpiração e favorecendo o uso do carbono para crescimento vegetal.

Tabela 1. Valores médios para os parâmetros de trocas gasosas sob aplicação de biocarvões, com diferenças significativas em relação ao controle Dunnett

Tratamentos	Médias dos tratamentos				
	An	gs	Tr	Ci	EUAint
Controle	28.7	5.0	3.2	322.0	6.0
BLP5	25.5	1.8*	2.7	318.0	15.1
BLP10	25.5	2.7*	3.1	323.0	11.4
BLP20	24.6	1.7*	2.8	314.5	17.3*
BLP40	22.5	1.1*	2.5	311.3	21.9*
BBC5	25.8	2.6*	3.1	327.0	11.0
BBC10	25.0	6.1	2.6	323.5	4.5
BBC20	24.8	2.7*	3.0	326.0	11.1
BBC40	29.2	4.2	29.2	343.0	7.1

BLP5, BLP10, BLP20, BLP40, BBC5, BBC10, BBC20, BBC40: biocarvões de lodo com poda de caju e de bagaço de caju nas doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹. *significativa pelo teste Dunnett, $p < 0,05$. Diferença mínima significativa gs: 2.1747 e EUAint: 10.21

CONCLUSÕES

A aplicação dos biocarvões promoveu efeitos distintos na fisiologia do milho cultivado em solo degradado. O BLP destacou-se por aumentar a eficiência do uso da água pelas plantas, associado ao menor grau de abertura estomática, o que sugere melhor aproveitamento hídrico sem prejuízo à fotossíntese. Já o BBC favoreceu a estabilidade das trocas gasosas, com comportamento próximo ao do solo não corrigido, sobretudo nas doses moderadas. Os resultados confirmam que o BLP apresenta maior potencial para aprimorar a eficiência hídrica das plantas, enquanto os efeitos variam conforme o tipo de biocarvão e a dose aplicada.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FINEP, CAGECE, CAPES (Cód. 001, projetos 88887.753195/2022-00 e 88887.964797/2024-00); ao INCT em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical-INCTAGriS (CNPq/Funcap/Capes), processos 406570/2022-1 (CNPq) e Processo INCT-35960-62747.65.95/51 (Funcap) e ao INCT em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical-INCTAGriS (CNPq/Funcap/Capes).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, A. S. F.: DE MEDEIROS, E. V.: DA COSTA, D. P.: PEREIRA, A. P. DE A.: MENDES, L. W. (2024). From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties. **Journal of Environmental Management**, 351, 119746. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119746>
- CAO, J.: JIANG, Y.: TAN, X.: LI, L.: CAO, S.: DOU, J.: CHEN, R.: HU, X.: QIU, Z.: LI, M.: CHEN, Z.: ZHU, H. (2024). Sludge-based biochar preparation: pyrolysis and co-pyrolysis methods, improvements, and environmental applications. **Fuel**, 373, 132265. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.132265>

- Chen, G.: Tian, S.: Liu, B.: Hu, M.: Ma, W.: Li, X. (2020). Stabilization of heavy metals during co-pyrolysis of sewage sludge and excavated waste. **Waste Management**, 103, 268–275. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.12.031>
- MONIZ, T.C.D.: SANTOS, J. M. R.: SILVA, H, G.: BARBOSA, F. L. A.: SOUSA, J. I. R.: NASCIMENTO, Í. V.: SANTOS, Q. A.: DIAS, C. T.S: GONÇALVES, M. V. R.: COSTA, M. C. G.:FREITAS, S. H. H.: SILVA, F. G.: FREGOLENTE, L. G.: FERREIRA, O. P.: SOUZA FILHO, A. G.: COSTA, R. S.: MOTA, J. C. A. (2025). Biochar Application to Recover Degraded Soils: Comparison of Different Biomass Sources Assessed by Soil Physical Quality and Maize Growth. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02509-6>
- DERPSCH, R.: KASSAM, A.: REICOSKY, D.: FRIEDRICH, T.: CALEGARI, A.: BASCH, G.: GONZALEZ-SANCHEZ, E.; DOS SANTOS, D. R. (2024). Nature’s laws of declining soil productivity and Conservation Agriculture. **Soil Security**, 14, 100127. <https://doi.org/10.1016/J.SOISEC.2024.100127>
- DI SANTO, T.: MARZAIOLI, R.: COPPOLA, E.: ZACCARIELLO, L.: BATTAGLIA, D.: CASTALDI, S.: D’ASCOLI, R.: PAPA, S.: STRUMIA, S.: BATTIPAGLIA, G.: MORRA, L.: MASTELLONE, M. L.:RUTIGLIANO, F. A. (2025). Enhancing soil health with hydrochar: Improvements in chemical and biological properties. **Journal of Environmental Management**, 385, 125659. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.125659>
- DIXIT, M.: GHOSHAL, D.: LAL MEENA, A.: GHASAL, P. C.: RAI, A. K.: CHOUDHARY, J.: DUTTA, D. (2024). Changes in soil microbial diversity under present land degradation scenario. **Total Environment Advances**, 10, 200104. <https://doi.org/10.1016/J.TEADVA.2024.200104>
- FAN, Z.: ZHOU, X.: PENG, Z.: WAN, S.: GAO, Z. F.: DENG, S.: TONG, L.: HAN, W.: CHEN, X. (2023). Co-pyrolysis technology for enhancing the functionality of sewage sludge biochar and immobilizing heavy metals. **Chemosphere**, 317, 137929. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.137929>