XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

BIOCHAR MODULA A INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS TROPICAIS POR MEIO DA REORGANIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO

Ricardo Euzébio Ribeiro Silva[1]; Marcos Henrique Cardoso Souza Feitosa[2]; Andreza Nunes[1]
*Olavo José Marques Ferreira[3], Maria Isidória Silva Gonzaga[1,3]**

RESUMO – A dinâmica da água no solo é governada principalmente pelos processos de infiltração, fluxo e retenção, os quais são influenciados pela distribuição do tamanho das partículas e pelas características estruturais do solo. Consequentemente, diferentes classes de solo apresentam comportamentos hidrológicos distintos e podem se beneficiar da aplicação de biochar como forma de regular as funções hidráulicas e aumentar a eficiência do uso da água em sistemas agrícolas. Este estudo avaliou os efeitos do biochar de resíduo do coco verde (RFCV) na infiltração de água em duas classes de solo de Sergipe, Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe). O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, envolvendo duas doses de biochar (1% e 5%) e duas granulometrias (≤1 mm e ≤2 mm). No RQ, a infiltração foi reduzida entre 12,4% e 49%, acompanhada por aumento superior a 8.000% na microporosidade (<0,2 µm), evidenciando profunda reorganização da arquitetura porosa. Em contraste, o PVAe apresentou aumento da infiltração de até 113%, associado ao incremento de macro e mesoporos. Além disso, o biochar elevou teores de carbono total entre 70% e 743%. Os resultados evidenciam o potencial do biochar como estratégia para o aumento da resiliência hidrológica em solos tropicais.

ABSTRACT– Soil water dynamics are primarily governed by infiltration, flow, and retention processes, which are influenced by soil particle-size distribution and structural characteristics. Consequently, different soil classes exhibit distinct hydrological behaviors and may benefit from biochar application as a means of regulating soil hydraulic functions and enhancing water-use efficiency in agricultural systems.This study evaluated the effects of green coconut fruit waste biochar (GCFW biochar) on water infiltration in two soil classes from Sergipe, Brazil: Quartzipsamment (RQ) and Eutrophic Red-Yellow Ultisol (PVAe). The experiment was conducted using a randomized complete block design in a 2 × 2 × 2 factorial arrangement, involving two biochar application rates (1% and 5%) and two particle-size classes (≤1 mm and ≤2 mm). In the Quartzipsamment, water infiltration decreased by 12.4% to 49%, accompanied by an increase of more than 8,000% in microporosity (<0.2 µm), indicating substantial reorganization of the pore architecture. In contrast, the Ultisol exhibited an increase in water infiltration of up to 113%, associated with greater macro- and mesoporosity. In addition, biochar application increased total carbon contents by 70% to 743%. These findings demonstrate the potential of GCFW biochar as a strategy for enhancing hydrological resilience in tropical soils.

Palavras-Chave – funcionalidade hidráulica; solos tropicais; carbono do solo

[1] Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.
[2] Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.
[3] Departamento de Engenharia Agronômica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

1. INTRODUÇÃO

A infiltração da água é um processo central na funcionalidade hidrológica dos agroecossistemas, pois regula a partição da água entre armazenamento no solo, recarga de aquíferos, escoamento superficial e erosão (Chávez-Collantes et al., 2025). No manejo da irrigação, determina não apenas a entrada da água no perfil, mas também sua redistribuição e permanência na zona radicular (Ahuja, 2022). Esse processo é controlado principalmente pela arquitetura porosa do solo, especialmente pela distribuição e conectividade dos poros, que variam amplamente entre classes pedológicas (Yu e Lu, 2019; Wu et al., 2025).

Em solos arenosos, como os Neossolos Quartzarênicos, a elevada macroporosidade favorece drenagem rápida e menor permanência da água no perfil (Hura e Gulo, 2024; Bhatt et al., 2025). Em contraste, Argissolos tendem a apresentar maior proporção de partículas finas e possíveis limitações estruturais que podem restringir a infiltração e intensificar o escoamento superficial (Dewangan, 2023). Assim, estratégias capazes de reorganizar a rede de poros e otimizar a funcionalidade hidráulica são essenciais para aumentar a eficiência do uso da água na agricultura tropical.

Paralelamente, extensas áreas agrícolas tropicais apresentam baixos teores de carbono orgânico, enquanto grandes volumes de resíduos agroindustriais permanecem subutilizados. Entre esses resíduos, destaca-se o fruto do coco verde, cujo descarte inadequado constitui um passivo ambiental crescente em regiões tropicais. A conversão dessa biomassa em biochar representa uma abordagem capaz de integrar valorização de resíduos, incremento de carbono no solo e melhoria de atributos físicos associados à dinâmica da água (Gonzaga et al., 2025).

Estudos recentes demonstram que o biochar pode alterar a estrutura porosa do solo, modificando a distribuição de macro, meso e microporos e, consequentemente, a infiltração da água (Santos et al., 2022). Contudo, seus efeitos permanecem altamente dependentes da textura do solo, da dose aplicada e das características físicas do próprio biochar. Embora alterações na retenção de água e na densidade do solo sejam amplamente relatadas, ainda são limitadas as evidências sobre os mecanismos pelos quais o biochar reorganiza a arquitetura porosa e regula a infiltração em solos tropicais contrastantes.

Diante dessa lacuna, este estudo avaliou os efeitos do biochar produzido a partir de resíduos do fruto do coco verde sobre a infiltração da água, a distribuição funcional da porosidade e o carbono total em Neossolo Quartzarênico e Argissolo Vermelho-Amarelo, solos representativos de Sergipe. A hipótese central é que o biochar atua como regulador da funcionalidade hidráulica do solo, promovendo respostas distintas em função da textura e da estrutura inicial da rede de poros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os resíduos do fruto do coco verde (RFCV) foram coletados em pontos de comercialização de água de coco em Aracaju, Sergipe (Figura 1). A biomassa foi fragmentada em triturador de lâminas rotativas (CID, modelo 10079), seca ao ar e submetida à pirólise a 700 °C por 15 min em forno mufla (Fornos Lavoisier, modelo 402D). Não foi realizada prensagem prévia do material, visando evitar a geração adicional de efluentes líquidos. Após a pirólise, o biochar foi moído, peneirado em malhas de 2 mm e 1 mm, conforme o delineamento experimental, e armazenado para posterior utilização.

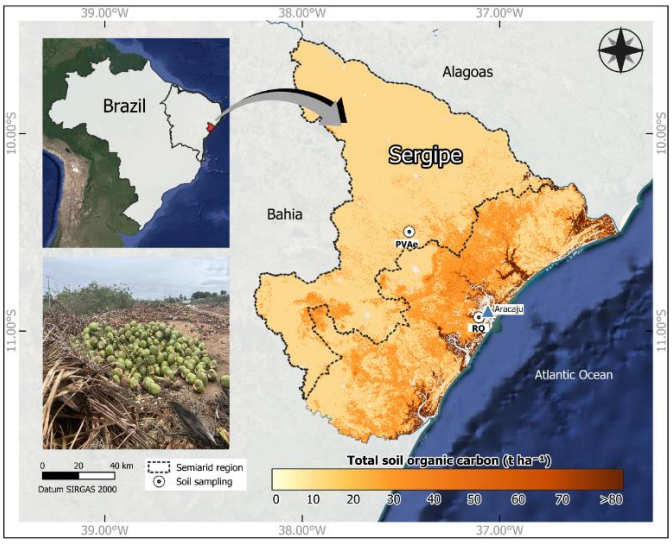


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo em Sergipe, Nordeste do Brasil, indicando os pontos de coleta dos dois solos avaliados (Neossolo Quartzarênico-RQ e Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico-PVAe), a distribuição do carbono orgânico do solo (0–30 cm) no ano de 2023, o limite da região semiárida e o registro fotográfico dos resíduos de coco verde descartados após a extração da água para consumo humano. Fonte: Autor (2026)

Amostras do biochar foram utilizadas para determinação de suas características físico-químicas e funcionais (Tabela 1). A densidade aparente do biochar foi determinada pelo método de autocompactação, descrito por Teixeira et al. (2017). A análise imediata foi realizada para determinação dos teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, seguindo procedimentos padronizados adaptados das normas ABNT NBR 16586 (2017), ABNT NBR 16587 (2017) e ABNT NBR 16702 (2018). A capacidade de retenção de água (CRA) foi determinada conforme o boletim técnico SL447 (Bhadha et al., 2017).

Tabela 1 - Densidade, teores de matéria volátil, cinzas e carbono fixo do biochar de resíduos de coco verde, em duas granulometrias, G1 (d ≤ 1 mm) e G2 (d ≤ 2 mm)

Característica	unidade	Biochar	
		1mm	2mm
Densidade	g cm^{-3}	0,274	0,268
Matéria volátil	%	7,83	7,11
Cinzas	%	15,0	12,5
Carbono Fixo	%	52,6	55,0
CRA	cm^3 cm^{-3}	0,98	1,05

2.1. Coleta e caracterização dos solos usados no experimento

Foram usados solos de 2 classes distintas, com diferentes características e representativos de regiões tropicais: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) e Neossolo Quartzarênico (RQ). A localização dos solos está apresentada na Figura 1.

O Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe), coletado em Ribeirópolis (10°29'49.5"S; 37°27'28.4"O; 205 m), está situado no agreste sergipano, região de transição entre o litoral úmido e o semiárido. O clima tropical é Aw, com uma estação seca de 4 a 5 meses, temperatura média anual de 24,7°C e precipitação média de 886 mm. Os Argissolos são a ordem de solo predominante em Sergipe, cobrindo aproximadamente 37% da área (IBGE, 2023), na região onde se concentra o maior número de estabelecimentos agrícolas do estado (SANTOS, 2023).

O Neossolo Quartzarênico (RQ), coletado em São Cristóvão (10°55’51.5”S; 37°6’18.7”O; 12 m), é um solo pouco desenvolvido, com textura predominantemente arenosa e mais de 95% de quartzo nas frações de areia grossa e fina. É a segunda ordem mais representativa de Sergipe e abrange cerca de 35% do território, com predomínio na região centro-oeste, especialmente no Agreste e nas zonas de transição para o Semiárido (IBGE, 2023).

As amostras de solo foram coletadas na camada superficial de 0-20 cm, submetidas à secagem ao ar, destorroamento e peneiramento (nº 10; ASTM; abertura de 2 mm). Subamostras de solo foram destinadas às análises físicas e químicas (Teixeira et al., 2017) e os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos solos do experimento

Características	RQ	PVAe
Areia (%)	91,5	62,9
Silte (%)	6,0	18,6
Argila (%)	2,5	18,5
Classe Textural	Areia	Franco Arenoso
Densidade (g cm^{-3})	1,60	1,46
Carbono Organico (%)	0,38	0,74
CTC (cmolc kg^{-1})	3,09	8,58

2.2. Instalação e avaliação experimental

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 2 × 2 × 2, envolvendo os fatores tipo de solo (dois solos: RQ e PVAe), dose de biochar (duas doses: 1% e 5%, em base massa) e granulometria do biochar (duas classes: ≤1 mm e ≤2 mm), totalizando 12 combinações fatoriais. Adicionalmente, foi incluído um tratamento controle (sem aplicação de biochar) para cada tipo de solo, perfazendo 15 tratamentos, conduzidos em triplicata, resultando em 45 unidades experimentais.

Os tratamentos foram previamente homogeneizados e umedecidos até 70% da capacidade de campo (CC). A CC de cada solo foi determinada previamente em laboratório pelo método do bulbo úmido. Após o ajuste da umidade, as amostras foram incubadas por 30 dias, com o objetivo de promover a interação entre as partículas de biochar e a matriz do solo, bem como a estabilização físico-hídrica do sistema solo–biochar antes das avaliações.

2.3. Ensaios de infiltração em colunas de solo

Os ensaios de infiltração foram conduzidos em colunas cilíndricas de PVC com 15 cm de comprimento e diâmetro interno de 72 mm. A base das colunas foi revestida com tecido tipo morim, permitindo a drenagem da água sem perda de partículas. A superfície interna foi rugosificada para reduzir fluxo preferencial na interface solo-parede.

As colunas foram preenchidas até 10 cm de altura com solo previamente homogeneizado, utilizando a massa ajustada à densidade de cada tratamento. O preenchimento foi realizado de forma gradual, com compactação padronizada por quedas sucessivas da coluna a partir de 5 cm de altura.

A taxa de infiltração foi determinada pela aplicação sucessiva de cinco lâminas de água de 5 mm sobre a superfície do solo, totalizando 25 mm acumulados. O tempo de infiltração de cada lâmina foi registrado entre a aplicação da água e o desaparecimento completo da lâmina na superfície. A taxa de infiltração (mm h^{-1}) foi calculada a partir da relação entre lâmina aplicada e tempo correspondente, utilizando-se a média das cinco determinações para cada unidade experimental.

2.4. Determinação da densidade e da porosidade dos solos nos tratamentos

A densidade do solo foi determinada pelo método de autocompactação, e a porosidade foi obtida por meio de curvas de retenção de água sob tensões de 0; 6; 10; 33; 100; 300; 500 e 1500 kPa (TEIXEIRA et al., 2017). A distribuição dos poros foi estimada pela relação entre potencial matricial e diâmetro equivalente, utilizando a equação da capilaridade. Os poros foram agrupados em macroporos (>50 µm), mesoporos (0,2–50 µm) e microporos (<0,2 µm), conforme Brewer (1964).

2.5. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas no software PAST 4.03. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando observados efeitos significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). A homogeneidade de variâncias foi avaliada pelo teste de Levene. As variações percentuais em relação ao controle foram utilizadas como medida complementar da magnitude das respostas dos solos ao biochar RFCV. Os gráficos foram elaborados nos softwares R e SigmaPlot 12.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa de infiltração regime transiente foi significativamente influenciada pelos tratamentos com biochar RFCV nos solos avaliados, com magnitude e direção dos efeitos evidenciando forte interação entre classe de solo, dose e granulometria do biochar (Figura 2).

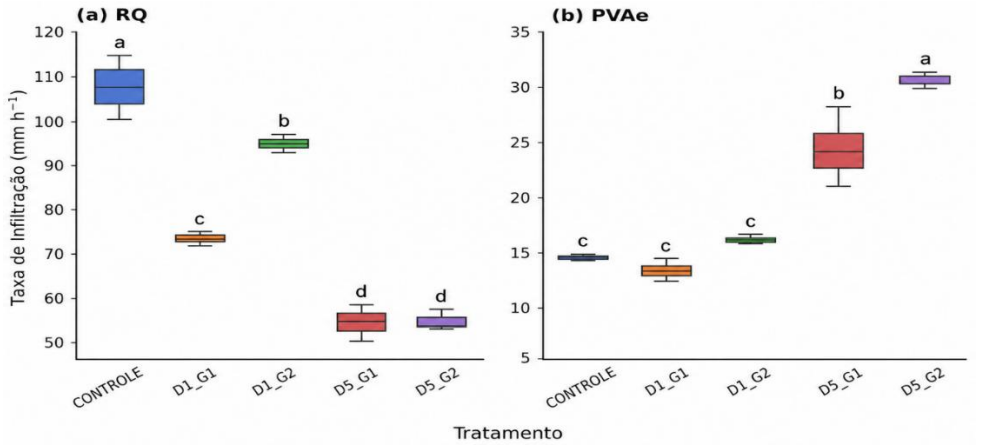


Figura 2 – Variação da taxa de infiltração do solo (mm h^{-1}) nas classes de solo RQ e PVAe, submetidas a cinco tratamentos com biochar RFCV. D1: dose de 1% de biochar; D5: dose de 5% de biochar; G1: granulometria de 1mm; G2: granulometria de 2mm. As letras indicam diferenças significativas (Tukey; $p \leq 0,05$) dentro de cada solo; tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Fonte: Autor (2026).

No solo RQ, de classificação textural "Areia" e caracterizado por elevada macroporosidade estrutural, a incorporação do biochar RFCV promoveu redução progressiva da taxa de infiltração. O tratamento controle apresentou a maior infiltração (107,75 mm h^{-1}), com decréscimos variando de 12,4% no tratamento D1G2 até aproximadamente 49% nos tratamentos D5. A ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos D5 indica que, na dose de 5%, a granulometria do biochar RFCV exerceu influência limitada sobre a dinâmica do fluxo hídrico nesse solo, sugerindo que o sistema já havia atingido um limiar estrutural de reorganização da porosidade.

Solos arenosos como o RQ geralmente apresentam elevadas taxas de infiltração e de fluxo de água; consequentemente, possuem baixa capacidade de retenção. Isso implica no manejo da irrigação, principalmente por aumentar a frequência de rega (Hura e Gulo, 2024; Bhatt et al., 2025). A redução da infiltração no RQ com biochar possivelmente está associada à reorganização do sistema poroso, com aumento relativo da microporosidade e possível ocupação parcial dos macroporos condutores, reduzindo a continuidade do fluxo gravitacional (Yu e Lu, 2019; Wu et al., 2025). Esses resultados indicam que, em solos excessivamente drenados, o biochar pode atuar como moderador hidráulico, reduzindo fluxos preferenciais excessivos e aumentando a retenção da água no solo.

Em contraste, o PVAe, de classificação textural "Franco-arenosa", apresentou aumento expressivo da infiltração em resposta à aplicação do biochar. As doses de 1% não diferiram estatisticamente do controle, indicando efeito limitado em baixas taxas de aplicação. Por outro lado,

os tratamentos com 5% de biochar promoveram incrementos substanciais e progressivos da infiltração, atingindo 24,5 mm h^{-1} no tratamento D5G1 (+69% em relação ao controle) e 30,8 mm h^{-1} no D5G2 (+113%). Solos de textura média como o PVAe apresentam moderada taxa de infiltração, normalmente entre 5 -15 mm h^{-1}, a depender das condições da estrutura e das proporções de areia, silte e argila (Dewangan, 2023). Nesses solos, o aumento excessivo da taxa de infiltração (> 30 mm h^{-1}) com a presença de biochar, caso seja acompanhada de aumento no fluxo de água através do perfil, pode provocar efeitos negativos na dinâmica da água no solo. Contudo, elevada infiltração de água acompanhada de aumento na retenção é satisfatório uma vez que melhora o armazenamento e a disponibilidade de água no solo (Pandey, 2025). Esses resultados sugerem a existência de um limiar crítico de aplicação a partir do qual o biochar passa a promover modificações estruturais capazes de aumentar a conectividade do sistema poroso e a continuidade do fluxo hídrico em solos de textura média.

3.1 Densidade do solo

A incorporação de biochar RFCV reduziu a densidade em todos os solos, com maior efeito nas doses de 5% (Figura 3). No RQ, a densidade reduziu de 1,60 g cm^{-3} para 1,43–1,42 g cm^{-3} e no PVAe de 1,46 para 1,33–1,32 g cm^{-3}, correspondendo a reduções aproximadas de 11–17%.

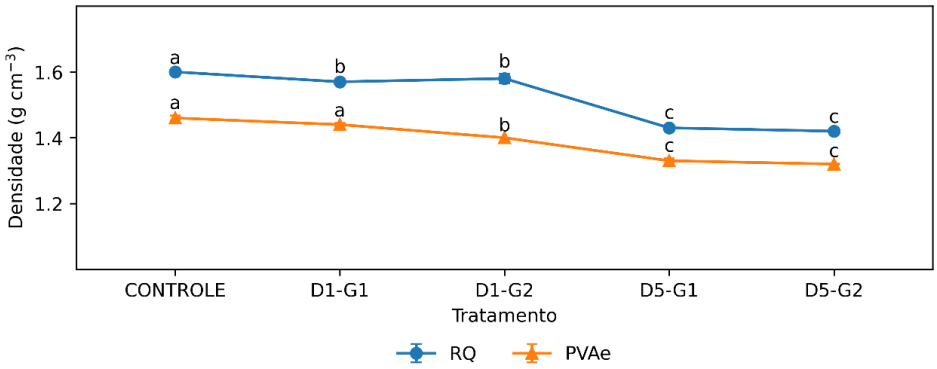


Figura 3 – Variação da densidade do solo nos solos RQ e PVAe, submetidos a cinco tratamentos com biochar RFCV. D1: dose de 1% de biochar; D5: dose de 5% de biochar; G1: granulometria de 1mm; G2: granulometria de 2mm. As letras indicam diferenças significativas (Tukey; $p \leq 0,05$) dentro de cada solo; tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Fonte: Autor (2026).

Os resultados refletem a substituição volumétrica promovida pelo biochar RFCV, material de baixa densidade. Contudo, a redução da densidade não implica necessariamente melhoria direta da funcionalidade hídrica, pois esse atributo não descreve a distribuição, conectividade e continuidade do sistema poroso. Assim, as alterações na infiltração devem ser interpretadas principalmente a partir da reorganização da arquitetura dos poros, como também indicado por estudos recentes em solos tropicais (LIMA et al., 2024).

3.2 Distribuição da porosidade por classes de poros

A aplicação do biochar RFCV promoveu alterações significativas na distribuição funcional da porosidade, afetando de forma distinta as frações de microporos (<0,2 µm), mesoporos (0,6–30 µm) e macroporos (≥50 µm) (Figura 4). O baixo teor de materiais voláteis do biochar indica elevada temperatura de pirólise (700 °C), condição associada à formação predominante de microporos intrapartícula (Lehmann e Joseph, 2015).

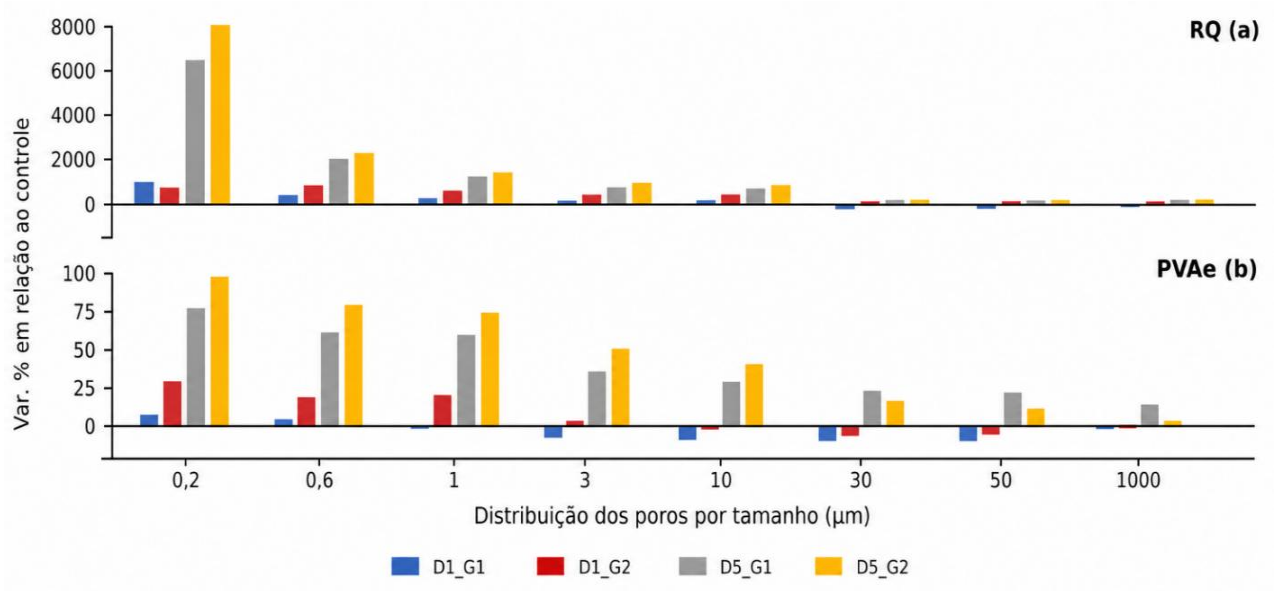


Figura 4 – Efeito do biochar RFCV na distribuição da porosidade dos solos: (b) RQ e (b) PVAe, expresso como variação percentual da umidade volumétrica (cm³ cm⁻³) em relação ao Controle, representando a alteração relativa na contribuição das diferentes classes de poros. As classes foram agrupadas em microporos (0,2 µm), mesoporos (0,6; 1; 3; 10 e 30 µm) e macroporos (50 e 1000 µm), correspondentes aos potenciais matriciais de −1500, −500, −300, −100, −33, −10, −6 e 0 kPa, conforme a equação da capilaridade. D1: dose de 1% de biochar; D5: dose de 5% de biochar; G1: granulometria de 1mm; G2: granulometria de 2mm. Fonte: Autor (2026).

No RQ, a microporosidade (<0,2 µm) aumentou de 0,001 para 0,084 cm³ cm⁻³, representando incremento superior a 8.000%. Apesar da influência do baixo valor inicial sobre a magnitude relativa da resposta, o resultado revela uma alteração substancial na distribuição funcional dos poros, indicando deslocamento do sistema poroso em direção a domínios de menor diâmetro. Essa reorganização estrutural ajuda a explicar a redução da infiltração observada nesse solo, em função da menor continuidade dos poros condutores e do aumento da retenção de água em microporos.

Em contraste, no PVAe, o aumento da microporosidade foi mais discreto e ocorreu simultaneamente ao incremento das frações macro e mesoporosa. A macroporosidade aumentou cerca de 19% (0,32 → 0,38 cm³ cm⁻³), enquanto os mesoporos de 10–30 µm apresentaram incremento aproximado de 37%, indicando maior conectividade do sistema poroso e favorecendo o fluxo de água no solo.

3.3 Determinação de Carbono Total

A incorporação do biochar RFCV, contendo aproximadamente 60% de carbono total, promoveu aumentos expressivos nos teores de carbono dos solos avaliados (Figura 5). Os incrementos variaram de 70% a 743% em relação aos tratamentos controle, sendo mais pronunciados RQ.

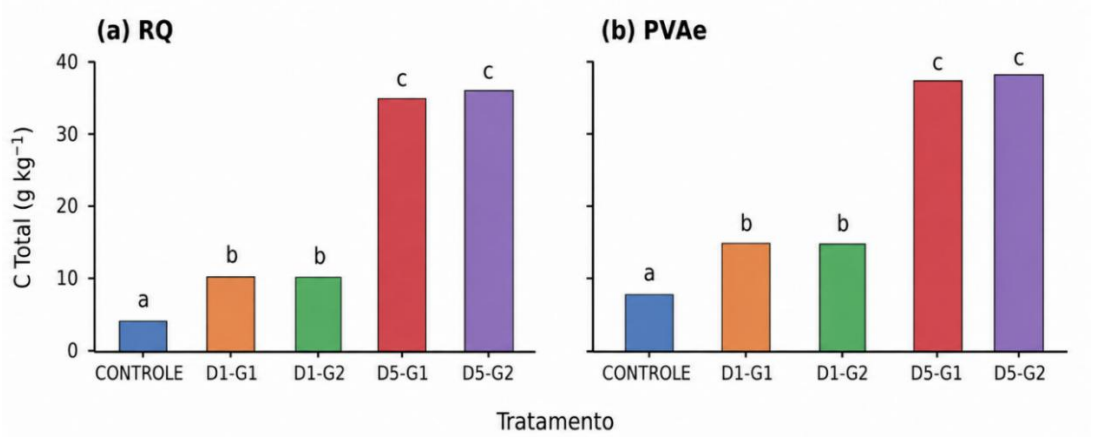


Figura 5 – Caracterização de Carbono Total (g kg^{-1}) dos solos avaliados (a) RQ e (b) PVAe, submetidos a cinco tratamentos com biochar RFCV. D1: dose de 1% de biochar; D5: dose de 5% de biochar; G1: granulometria de 1mm; G2: granulometria de 2mm. As letras indicam diferenças significativas (Tukey; $p \leq 0,05$) dentro de cada solo; tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Fonte: Autor (2026)

No RQ, o carbono total aumentou de 4,1 g kg^{-1} no controle para aproximadamente 10 g kg^{-1} nos tratamentos com 1% de biochar (+140%) e 33 g kg^{-1} nos tratamentos com 5% (+700%). No PVAe, os teores passaram de cerca de 8 g kg^{-1} para 14 g kg^{-1} (+70%) com 1% de biochar e atingiram aproximadamente 37 g kg^{-1} (+350%) com a dose de 5%. O aumento do teor de carbono orgânico do solo após a aplicação de biochar é esperado e reportado em vários estudos (Gonzaga et al., 2025; Santos et al., 2022) por se tratar de material com elevada concentração de C (Tabela 1). A diferença importante entre a aplicação de resíduos frescos, como os estercos, e pirolisados, como o biochar, é a estabilidade do carbono e seu potencial para permanecer no solo por milhares de anos (Spokas, 2010). Sendo assim, seu efeito na regulação hídrica do solo é duradouro, permitindo maior previsibilidade no manejo da irrigação.

4. CONCLUSÃO

O biochar produzido a partir de resíduos de coco verde promoveu respostas contrastantes na infiltração da água, determinadas pela textura e pela estrutura inicial dos solos. As alterações observadas estiveram associadas à reorganização da arquitetura porosa, evidenciando que a funcionalidade hidráulica do solo é controlada principalmente pela distribuição e conectividade dos poros. Além de modular a infiltração, o biochar aumentou substancialmente os teores de carbono total, reforçando seu potencial como estratégia integrada para sequestro de carbono, aumento da resiliência hidrológica e adaptação da agricultura tropical às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AHUJA, L. R. Water and chemical transport in the soil matrix and macropores. Madison: Soil Science Society of America, 2022. p. 1–32. DOI: 10.1002/9780891183860.ch1.

BHADHA, J., CAPASSO, J., KHATIWADA, R., Swanson, S. (2017). Raising soil organic matter content to improve water holding capacity. EDIS. https://doi.org/10.3273/edis-ss661-2017

BHATT, R.; KUNAL, K.; GARG, A. K.; MAJUMDER, D.; VERMA, K. K.; DE OLIVEIR, M. W. Soil texture: unlocking fertility and productivity for better crops. AATCC Review, v. 13, n. 3, p. 396–408, 2025. DOI: 10.21276/aatccreview.2025.13.03.396.

BREWER, R. Fabric and mineral analysis of soils. New York: John Wiley & Sons, 1964.

CHÁVEZ-COLLANTES, A. et al. Influence of vegetation cover and soil properties on water infiltration. Water, v. 17, n. 15, artigo 2280, 2025. DOI: 10.3390/w17152280.

DEWANGAN, S. Using the soil texture triangle to evaluate the effect of soil texture on water flow: a review. International Journal for Science Technology and Engineering, v. 11, n. 6, p. 389–393, 2023. DOI: 10.22214/ijraset.2023.53635.

GONZAGA, M. I. S. et al. Assessing the impact of pre-treated green coconut waste biochar on tropical soil fertility, initial plant growth, and nutrient uptake using PCA analysis. Journal of Soils and Sediments, v. 25, p. 1213–1226, 2025. DOI: 10.1007/s11368-025-04005-x.

HURA, J. K.; GULO, M. Analisis permeabilitas tanah berpasir dan tanah lempung dalam hubunganya dengan manajemen irigasi. Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan, v. 1, n. 2, p. 60–67, 2024. DOI: 10.70134/penarik.v1i1.63.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. BDiA – Banco de Dados e Informações Ambientais: Mapeamento de Recurso Naturais (MRN), versão 3.0.0, 2023.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation. 2. ed. London: Routledge, 2015.

LIMA, A. Y. V. et al. Mapping soil health research in the Brazilian Semiarid region: a bibliometric approach. Experimental Agriculture, v. 60, p. e29, 2024.

PANDEY, K. Enhancing water use efficiency through soil health in organic farming systems. Zenodo, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.15637391.

SANTOS, J. L. A.; GONZAGA, M. I. S.; SANTOS, W. M. dos; SILVA, A. J. da. Water retention and availability in tropical soils of different textures amended with biochar. *Catena*, Amsterdam, v. 219, e106616, 2022a. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106616.

SANTOS, P. H. N.; BARROS, G. V. P. de; FERREIRA, W. S. Perfil climático e cobertura do solo: o cenário do estado de Sergipe. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 1, p. 101–115, 2023. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p101-115.

SPOKAS, K. A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, v. 1, n. 2, p. 289-303, 2010. DOI: 10.4155/cmt.10.32.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573 p.

WU, X.; LI, Y.; ZHA, Y.; LI, S. Biochar's impact on soil structure and hydrological properties in saline land. EGUsphere, 2025. DOI: 10.5194/egusphere-egu25-5342.

YU, X.; LU, S. Reconfiguration of macropore networks in a silty loam soil following biochar addition identified by X-ray microtomography and network analyses. European Journal of Soil Science, v. 70, n. 3, p. 591–603, 2019. DOI: 10.1111/EJSS.12773.