

# Efeito da aplicação de biochar (BioC) na mineralização de azoto a partir de matéria orgânica num solo arenoso

## Effect of biochar (BioC) application on nitrogen mineralization from organic matter in a sandy soil

João Mourão<sup>1</sup>, Joel Ribeiro<sup>1</sup>, Francisco Saraiva<sup>1</sup>, Henrique Trindade<sup>1,2</sup>, Rupesh Kumar Singh<sup>1,2</sup>, João Coutinho<sup>1,3</sup> & João Ricardo Sousa<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal

<sup>2</sup> Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas (CITAB), UTAD, Vila Real, Portugal

<sup>3</sup> Centro de Química (CQ), UTAD, Vila Real, Portugal

(\*E-mail: jricardo@utad.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.38923>

Recebido/received: 2024.08.31

Aceite/accepted: 2024.10.25

### RESUMO

Nos solos arenosos, as condições de arejamento e acessibilidade biológica aceleram a mineralização da matéria orgânica. A aplicação de biochar (*BioC*), um material carbonáceo pirolítico, tem sido usada para melhorar a fertilidade do solo, sendo os respetivos efeitos nos processos biológicos de transformação da matéria orgânica ainda pouco conhecidos. Um ensaio de incubação biológica em condições de laboratório foi realizado para avaliar o processo de mineralização em um solo arenoso, sem (controlo) e com a adição de *BioC* (1%) (p/p). Os teores de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  no solo foram analisados aos 0, 3, 7, 14 e 28 dias de incubação, para determinação do N mineralizado ( $N_{min}$ ). Os valores de  $N_{min}$  foram ajustados a um modelo exponencial assintótico de um reservatório para estimativa das respetivas constantes,  $N_0$  e  $k_N$ . O modelo revelou elevada previsibilidade, explicando mais de 99% do  $N_{min}$  em ambos os tratamentos, com valores de  $N_0$  e  $k_N$  de 8,8, 12,4  $\text{mg kg}^{-1}$  e 0,092, 0,134  $\text{dia}^{-1}$ , para o solo com e sem *BioC*, respetivamente. A elevada de superfície específica e capacidade de retenção do *BioC* parecem proporcionar proteção da matéria orgânica do solo, explicando a redução das quantidades e da dinâmica da transformação do N, expressa numa redução de 29% no  $N_0$  e 31% na  $k_N$  com a respetiva adição. A adição de *BioC* pode ser uma estratégia importante na sustentabilidade da fertilidade do solo.

**Palavras-chave:** biochar, mineralização, matéria orgânica, azoto, sequestro.

### ABSTRACT

In sandy soils, the aeration and biological accessibility conditions accelerate the mineralization of organic matter. The application of biochar (*BioC*), a carbonaceous material produced through pyrolysis, has been used to improve soil fertility, although its effects on the biological processes of organic matter transformation remain poorly understood. A biological incubation assay was conducted under laboratory conditions to evaluate the mineralization process in sandy soil, both without (control) and with the addition of *BioC* (1%) (w/w). Soil  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  contents were analysed at 0, 3, 7, 14, and 28 days of incubation to evaluate mineralized N ( $N_{min}$ ). The  $N_{min}$  values were adjusted to an asymptotic exponential model of one pool to estimate the respective constants,  $N_0$  and  $k_N$ . The model revealed high predictability, explaining over 99% of the  $N_{min}$  in both treatments, with  $N_0$  and  $k_N$  values of 8.8, 12.4  $\text{mg kg}^{-1}$  and 0.092, 0.134  $\text{day}^{-1}$  for the soil with and without *BioC*, respectively. The high specific surface area and retention capacity of *BioC* appeared to provide protection for soil organic matter, explaining the reduction of the quantity and dynamics of N transformation, reflected in a 29% decrease in  $N_0$  and a 31% decrease in  $k_N$  with *BioC* addition. The addition of *BioC* may be an important strategy for sustaining soil fertility.

**Keywords:** biochar, mineralization, organic matter, nitrogen, sequestration.

## INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural essencial, de elevada complexidade, com uma importância fundamental na sustentabilidade dos ecossistemas e, consequentemente, na saúde humana. A degradação do solo é uma preocupação emergente, com este recurso a enfrentar um conjunto de desafios sem precedentes, decorrentes de atividades antropogênicas, relacionadas com práticas agrícolas inadequadas, desflorestação, urbanização, compactação, impermeabilização, salinização, acidificação, erosão e poluição química (Lal, 1997), que afetam a sua capacidade de desempenhar funções ecológicas exacerbando, por sua vez, problemas ambientais como as alterações climáticas (Hamidov *et al.*, 2018). A defesa do solo exige estratégias conjugadas, através de práticas mais sustentáveis de uso e conservação, como forma de garantir uma maior qualidade e saúde dos ecossistemas edáficos e sua sustentabilidade (Titirmare *et al.*, 2023), sendo a aplicação de matéria orgânica uma das mais seguidas, especialmente em solos de menor fertilidade (Brempong & Addo-Danso, 2022). Para além de melhorar os vários fatores físicos, químicos e biológicos da fertilidade do solo contribui, simultaneamente, para a reutilização, reciclagem e valorização de subprodutos gerados a partir de diferentes atividades (Liu *et al.*, 2006). Embora esta cadeia de valor, baseada em princípios de economia circular, permita a reutilização de materiais com valor agronómico, os efeitos da sua aplicação nem sempre permitem mitigar em ritmos desejados, os impactos negativos associados ao uso excessivo do solo (Paradelo *et al.*, 2024). Esta menor dinâmica é particularmente notada em solos de baixa fertilidade, com menores teores de matéria orgânica, texturas mais grosseiras, nos quais a maior biodisponibilidade do carbono orgânico, resultado dos baixos teores de minerais de argila, associados a um maior arejamento, promovem taxas de decomposição mais elevadas (Hassink *et al.*, 1993). Deste modo, o tratamento térmico pirolítico de subprodutos, tem sido explorado como uma alternativa para criar novos materiais, como o biochar (*BioC*). Obtido sob condições específicas este material tem potencial para ser uma solução inovadora e sustentável dentro da bioeconomia, ajudando a enfrentar desafios ambientais emergentes, contribuindo para a melhoria da qualidade do solo (Bhattacharya *et al.*, 2024). Deste modo, o trabalho

agora apresentado tem como objetivo avaliar o efeito da aplicação de um *BioC* na mineralização de N a partir da matéria orgânica num arenossolo, com base num ensaio de incubação biológica laboratorial de curta duração.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### *Solo e biochar*

Como matriz edáfica de suporte ao ensaio de incubação foi selecionado um solo, classificado de acordo com o W.R.B. (2016) como um arenossolo, recolhido na zona de Bisalhães (41°17'14"N 7°47'18"W 473), distrito de Vila Real, Portugal. Para efeitos de caracterização físico-química, procedeu-se à secagem (40-60 °C), durante um período de 24 a 48-h, e crivagem a 2 mm, com seleção da fração terra fina, sendo alguns dos respetivos resultados apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1** - Propriedades físico-químicas do solo e biochar (*BioC*) usados no ensaio de incubação laboratorial

|      | pH <sup>#</sup> | CE<br>(dS m <sup>-1</sup> ) | C <sub>tot</sub><br>(g kg <sup>-1</sup> ) | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | N <sub>tot</sub><br>(g kg <sup>-1</sup> ) | C:N  |
|------|-----------------|-----------------------------|---|--|--|---|------|
| Solo | 6,2             | 0,04                        | 35,2                                      | -  | -  | 3,4                                       | 10,4 |
| BioC | 9,2             | 1,8                         | 217,9                                     | 21,9   | 2,1  | 6,5                                       | 33,5 |

# em H<sub>2</sub>O (1:5); CE (condutividade elétrica, 1:5 em água)

Uma amostra, equivalente a duas vezes a massa de solo seco a usar no ensaio, com um teor de humidade ajustado para 60 % da capacidade máxima de retenção de água (CMRA), foi colocada a incubar durante um período de 15 dias, em condições laboratoriais, sem exposição à luz, com o objetivo de eliminar o efeito de *flush* resultante das operações de preparação, como secagem e crivagem. Como material condicionador, foi usado um material carbonáceo ou biochar comercial, resultante da pirólise de resíduos florestais, com a designação de Ecochar®. Este produto é definido pela empresa como um material condicionador do solo, de natureza perene, com uma durabilidade ou período de residência no solo superior a 100 anos, especificamente indicado para solos de reduzida fertilidade,

nomeadamente de textura arenosa, com baixos teores de matéria orgânica e reduzido poder de retenção de água e nutrientes. De acordo com a informação técnica disponibilizada, o *BioC* é um material resultante de um processo de pirólise controlada, a uma temperatura entre 300-600 °C, com uma densidade aparente de 0,3 a 0,4 g cm<sup>-3</sup>, uma granulometria inferior a 10 mm, carbono fixo superior a 90%, teor de humidade inferior a 7% e um pH em água alcalino. Esta informação foi complementada com a determinação de outros parâmetros, com os respetivos resultados apresentados no Quadro 1.

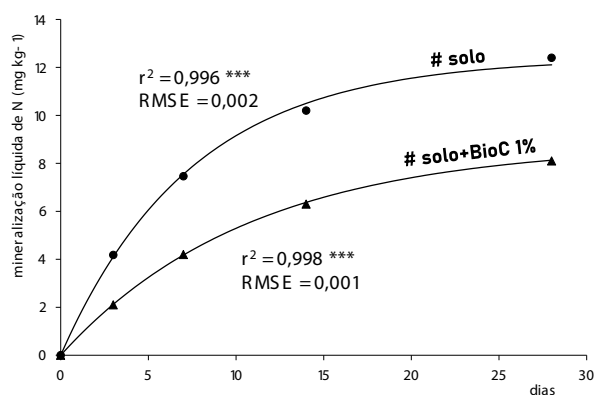
### *Incubação biológica*

Para efeito do estudo, em termos de delineamento experimental, foram considerados dois tratamentos: (i) controlo (S), relativo ao solo sem adição de *BioC*; e (ii) solo com adição de *BioC* (S+*BioC*), na dose de 1% (m/m). Para cada tratamento foram consideradas 3 repetições. Em termos do ensaio foi aplicado o procedimento seguido por Santos *et al.* (2021), com a realização de uma incubação biológica, em condições controladas de temperatura (20 °C), humidade (60% CMRA) e arejamento, durante um período de 28 dias. Para copos de 100 ml, foram pesados 50 g (peso seco) de solo pré-incubado, de acordo com os tratamentos, repetições e datas de amostragem ensaiadas (0, 3, 4, 7, 14 e 28 dias), num total de 36 copos com solo. No tratamento com *BioC* foi adicionado uma massa equivalente a 1% (m/m), previamente pesada e realizada a respetiva homogeneização. No final procedeu-se à correção dos respetivos teores de humidade, para valores de 60% da CMRA, através da adição de água desionizada. Para garantir um maior contato entre as frações sólidas do solo, em todos os copos a mistura foi suavemente compactada com um cilindro, com o objetivo de maior aproximação aos valores iniciais da densidade aparente do solo e garantir uniformidade entre os tratamentos. Os copos foram colocados a incubar, em estufa de temperatura e arejamento controlado, em ausência de luz, durante um período de incubação de 28 dias. Três copos, relativos a cada uma das datas de amostragem previstas, correspondentes a três repetições de cada tratamento estudado, foram amostrados e destruídos, de modo a avaliar o processo de mineralização de N a partir da matéria orgânica nativa do solo. Os teores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, após extração

em KCl 1 M(1:5), durante um período de 1 hora, foram determinados por espectrofotometria de absorção molecular, em autoanalisador de fluxo segmentado (SanPlus, SKALAR) (Houba *et al.*, 1995) e expressos em mg kg<sup>-1</sup>. As quantidades líquidas de N mineralizado ( $N_{min}$ ) em cada tratamento foram determinadas com base na diferença entre os respetivos teores obtidos em cada data e o tempo inicial (0 dias). Por sua vez, os valores de  $N_{min}$  foram ajustados a um modelo exponencial assintótico de um único reservatório, proposto por Stanford & Smith (1972) ( $N_{min} = N_0 * (1 - \exp(-k_N * \text{tempo}))$ ), para estimativa das respetivas constantes,  $N_0$ , referente ao azoto potencialmente mineralizável, e  $k_N$ , correspondente à constante de cinética de mineralização. A qualidade do ajustamento foi avaliada com base nos respetivos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e na raiz do erro quadrado médio (RMSE). Para comparação dos valores das respetivas constantes estimadas, para os modelos obtidos em cada tratamento, foi usado o teste *t-student*, para um nível de probabilidade de 5 %.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos estimados para os tratamentos estudados, controlo e solo com *BioC*, assim como a respetiva qualidade de ajustamento são apresentados na Figura 1. De um modo geral, o modelo exponencial assintótico de um único reservatório testado revelou uma elevada qualidade de ajustamento aos valores de mineralização líquida obtidos em cada tratamento, com os valores de  $r^2$  a variarem entre 0,991 e 0,998, para um nível de probabilidade de 0,001%. Com este modelo a explicar mais de 99% da variação de mineralização de N, é possível afirmar que o modelo é suficientemente robusto para estimar com elevada exatidão as constantes,  $N_0$  e  $k_N$ , cujos respetivos valores são apresentados no Quadro 2. Os resultados obtidos refletem as variações observadas na incubação laboratorial, com a adição de biochar a promover uma redução significativa das quantidades de N potencialmente mineralizável ( $N_0$ ) no solo. Estes resultados podem ser, em parte, explicados pelas características do material condicionador, nomeadamente a razão C:N (Quadro 1), influenciando desta forma os processos de disponibilidade de N, tal como vários autores observaram (Nguyen *et al.*, 2017; Gao & DeLuca, 2020).



**Figura 1** - Qualidade de ajustamento do modelo exponencial assintótico de um reservatório aos valores de  $N_{min}$  obtidos para os tratamentos estudados, solo (controle) e solo com adição de biochar (solo+BioC 1%).

Outros fatores, associados a fenômenos de superfície específica e carga elétrica destes materiais pirolíticos (Bhattacharya *et al.*, 2024), resultam numa menor disponibilidade de N amoniacal afetando, igualmente, o processo de nitrificação e, de uma maneira geral, a mineralização do N (Nguyen *et al.*, 2017). Estes fatores podem também explicar a redução significativa da dinâmica do processo de mineralização de N com a adição de *BioC*, traduzida por uma diminuição dos valores de  $k_N$ , refletindo assim o aumento do tempo de meia-vida ( $t_{1/2vida}$ ) de 5 para 8 dias (Quadro 2).

**Quadro 2** - Valores experimentais e estimados para o  $N_{min}$  e  $N_0$ ,  $k_N$  e  $t_{1/2vida}$ , respectivamente, para os tratamentos estudados: solo (controle) e solo com *BioC*

| Tratamento         | $N_{min}$<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | $N_0$<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | $k_N$<br>(dia <sup>-1</sup> ) | $t_{1/2vida}$ <sup>#</sup><br>(dia) |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Solo               | 12,4 <sup>b</sup>                   | 12,2 <sup>b</sup>               | 0,134 <sup>b</sup>            | 5,2 <sup>a</sup>                    |
| Solo+BioC 1% (m/m) | 8,1 <sup>a</sup>                    | 8,8 <sup>a</sup>                | 0,092 <sup>a</sup>            | 7,5 <sup>b</sup>                    |

#  $t_{1/2vida} = -\ln(1/2)/k_N = 0,693/k_N$ ; (para o mesmo parâmetro, linhas seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, para um nível de probabilidade de 95%).

No tratamento com biochar, a tendência de diminuição dos valores da constante cinética comparativamente ao tratamento controle, tal como observado para o  $N_0$ , fazem pressupor a existência de um aumento dos fenômenos de interação com matéria

orgânica do solo, responsáveis pela respetiva proteção, seja através de mecanismos químicos, como fenômenos de adsorção ou complexação (Sarkhot *et al.*, 2013), ou físicos, como oclusão em microporos (Soenne *et al.*, 2014), que promovem uma diminuição quer as quantidades de N mineralizado a partir da matéria orgânica ( $N_0$ ) como da respetiva dinâmica ou cinética dos processos biológicos ( $k_N$ ) (Davys *et al.*, 2023). Para além do efeito de proteção ou oclusão, Chen *et al.* (2017) justificam o efeito de *priming* negativo resultante da adição de *BioC*, com alterações na diversidade microbiana e na respetiva taxa de produção ou atividade enzimática. Este facto poderá estar relacionado com os potenciais efeitos do *BioC* nas condições físico-químicas do solo, que podem afetar negativamente o desenvolvimento e a colonização dos microrganismos. Apesar destes efeitos se apresentarem devidamente validados, comportamentos distintos aos observados no presente trabalho são, igualmente, descritos na bibliografia para o biochar (Yin *et al.*, 2021; Wigan, 2023). Tomczyk *et al.* (2020) referem que a qualidade dos efeitos está especialmente, dependente do tipo de biomassa e das condições de pirólise (Lataf *et al.*, 2022).

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que a adição de biochar promove uma redução dos processos de mineralização de N a partir da matéria orgânica do solo, quer em termos de quantidade ( $N_0$ ), quer da dinâmica dos processos ( $k_N$ ), com as respetivas características da qualidade físico-química, relacionadas com a razão C:N, superfície das partículas e respetiva capacidade de adsorção, fatores potencialmente determinantes. Estas características, associadas à capacidade de promover uma maior proteção da matéria orgânica, com a respetiva redução da acesibilidade para processos de oxidação biológica, contribuem assim para uma menor dinâmica da perda de matéria orgânica do solo, com o consequente aumento do sequestro de carbono e da qualidade do solo, permitindo uma maior sustentabilidade deste recurso natural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhattacharya, T.; Khan, A.; Ghosh, T.; Kim, J.T. & Rhim, J.-W. (2024) - Advances and prospects for biochar utilization in food processing and packaging applications. *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 39, art. e00831. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00831>
- Brempong, M.B. & Addo-Danso, A. (2022) - Improving Soil Fertility with Organic Fertilizers. In: New Generation of Organic Fertilizer. In: Turan, M. & Yildirim, E. (Eds.) - *IntechOpen*, vol. 1, p. 1-11. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.103944>
- Chen, Y.; Zhang, X.; Chen, W.; Yang, H. & Chen, H. (2017) - The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. *Bioresource Technology Review*, vol. 246, p. 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.138>
- Davys, D.; Rayns, F.; Charlesworth, S. & Lillywhite, R. (2023) - The effect of different biochar characteristics on soil nitrogen transformation processes: A review. *Sustainability*, vol. 15, n. 23, art. 16446. <https://doi.org/10.3390/su152316446>
- Gao, S. & DeLuca, T.H. (2020) - Biochar alters nitrogen and phosphorus dynamics in a western rangeland ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 148, art. 107868. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107868>
- Hamidov, A.; Helming, K.; Bellocchi, G.; Bojar, W.; Dalgaard, T.; Ghaley, B.B.; Hoffmann, C.; Holman, I.; Holzkämpfer, A.; Krzeminska, D.; Kværnø, S.H.; Lehtonen, H.; Niedrist, G.; Øygarden, L.; Reidsma, P.; Roggero, P.P.; Rusu, T.; Santos, C.; Seddaiu, G.; Skarbøvik, E.; Ventrella, D.; Żarski, J. & Schönhart, M. (2018) - Impacts of climate change adaptation options on soil functions: A review of European case-studies. *Land Degradation & Development*, vol. 29, n. 8, p. 2378-2389. <https://doi.org/10.1002/ldr.3006>
- Hassink, J.; Bouwman, L.A.; Zwart, K.B.; Bloem, J. & Brussaard, L. (1993) - Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and c and n mineralization in grassland soils. *Geoderma*, vol. 57, p. 105-128. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90150-J](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90150-J)
- Houba, V.J.G.; Huybrechts, A.W.M.; Wilting, P.; Novozamski, I. & Gozt, G. (1995) - Sugar yield, nitrogen uptake by sugar beet and optimal nitrogen fertilization in relation to nitrogen soil analysis and some additional factors. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 19, p. 55-59. <https://doi.org/10.1007/BF00336347>
- Lal, R. (1997) - Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, vol. 352, p. 997-1010. <http://doi.org/10.1098/rstb.1997.0078>
- Lataf, A.; Jozefckak, M.; Vandecasteele, B.; Viaene, J.; Schreurs, S.; Carleer, R.; Tperman, J.; Marchal, W.; Cuypers, A. & Vandamme, D. (2022) - The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 168, art. 105728. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105728>
- Liu, X.; Herbert, S.J.; Hashemi, A.M.; Zhang, X. & Ding, G. (2006) - Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation - a review. *Plant Soil and Environment*, vol. 52, n. 12, p. 531-543. <https://doi.org/10.17221/3544-PSE>
- Nguyen, T.T.; Xu, C.-Y.; Tahmasbian, I.; Che, R.; Zhou, X. & Wallace, H.M. (2017) - Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma*, vol. 288, p. 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.004>
- Paradelo, R.; Navarro-Pedreño, J.; Glaser, B.; Grobelak, A.; Kowalska, A. & Singh, B.R. (2023) - Potential and Constraints of Use of Organic Amendments from Agricultural Residues for Improvement of Soil Properties. *Sustainability*, vol. 16, n. 1, art. 158. <https://doi.org/10.3390/su16010158>
- Santos, C.; Fonseca, J.; Coutinho, J.; Trindade, H. & Jensen, L.S. (2021) - Chemical properties of agro-waste compost affect greenhouse gas emission from soils through changed C and N mineralisation. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 57, n. 6, p. 781-792. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01560-6>
- Sarkhot, D.V.; Ghezzehei, T.A. & Berhe, A.A. (2013) - Effectiveness of biochar for sorption of ammonium and phosphate from dairy effluent. *Journal of Environmental Quality*, vol. 42, n. 5, p. 1545-1554. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0482>
- Soinne, H.; Hovi, J.; Tammeorg, P. & Turtola, E. (2014) - Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma*, vol. 219-220, p. 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.022>

- Stanford, G. & Smith, S.J. (1972) - Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 36, n. 3, p. 465-472. <https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600030029x>
- Titirmare, N.S.; Gaikwad, A.S. & Margal, P.B. (2023) - Soil Pollution and Environmental Health. In: Chaware, S.A.; Sahoo, S.K.; Dash, M.; Jagadesh, M. & Kumar, S. (Eds.) - *Advances in Soil Science*, vol. 1, p. 267-307. Bright Sky Publications, New Delhi, India. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8331094>
- Tomczyk, A.; Sokołowska, Z. & Boguta, P. (2020) - Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Journal of Environmental Management*, vol. 276, art. 111297. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Wigan, M.B. (2023) - Impact of Biochar Application on Chemical and Microbial Properties of Soil. *International Journal of Multidisciplinary: Applied Business and Education Research*, vol. 4, p. 2503-2510. <https://doi.org/10.11594/ijmaber.04.07.27>
- WRB (2016) - *World Reference Base for Soil Resources*. World Resources Report N° 103, F.A.O., Rome, Italy.
- Yin, X.; Penuelas, J.; Xu, X.; Sardans, J.; Fang, Y.; Wiesmeier, M.; Cheng, Y. & Wang, W. (2021) - Effects of addition of nitrogen-enriched biochar on bacteria and fungi community structure and C, N, P, and Fe stoichiometry in subtropical paddy soils. *European Journal of Soil Biology*, vol. 106, art. 103351. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103351>.