

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE
SINOP INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

Andressa Strey

**BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: TEMPO E TEMPERATURA DE PIRÓLISE
NA PERFORMANCE AGRONÔMICA DA RÚCULA (*ERUCA vesicaria* (L.) CAV.)**

**SINOP
MATO GROSSO – BRASIL**

2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE
SINOP INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

ANDRESSA STREY

**BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: TEMPO E TEMPERATURA DE PIRÓLISE
NA PERFORMANCE AGRONÔMICA DA RÚCULA (*ERUCA vesicaria* (L.) CAV.)**

Orientador(a): Prof. Dr.(a). Fabiano Petter

Co-orientador(a): Dr.(a). Fabiana de Abreu Rezende

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso, Câmpus de Sinop, na área de concentração Recursos Naturais, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de pesquisa: Recursos Naturais.

**SINOP
MATO GROSSO – BRASIL**

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Andressa Strey

BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: TEMPO E
TEMPERATURA DE PIRÓLISE NA PERFORMANCE
AGRONÔMICA DA RÚCULA (*ERUCA vesicaria* (L.) CAV.)

Strey Andressa, 2024

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Petter

Co-orientadora: Dr.(a). Fabiana Abreu de Rezende

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do
Estado de Mato Grosso, Programa de Pós-
Graduação em Ciências Ambientais, 2024

Palavras chave: Pirólise. Hortaliças. Resíduos orgânicos.

FOLHA DE APROVAÇÃO

SEI/UFMT - 7150225 - MESTRADO - Folha de Aprovação

https://sei.ufmt.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_w...



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: TEMPO E TEMPERATURA DE PIRÓLISE NA PERFORMANCE AGRONÔMICA DA RÚCULA (ERUCA vesicaria (L.) CAV)"

AUTOR (A): Mestranda Andressa Strey

Dissertação defendida e aprovada em 09/09/2024.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Presidente da banca/Orientador(a) Doutor(a) Fabiano André Petter
Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO/CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
2. Examinador(a) Externo(a) Doutor(a) Cícero Célio de Figueiredo
Instituição : Universidade de Brasília
3. Examinador(a) Interno(a) Doutor(a) Sayonara Andrade do Couto Moreno Arantes
Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
4. Examinador(a) Suplente Doutor(a) Rafael Soares de Arruda
Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
5. Examinador(a) Suplente Doutor(a) Fabiana Abreu de Rezende
Instituição : EMBRAPA

SINOP, 09/09/2024.



Documento assinado eletronicamente por SAYONARA ANDRADE DO COUTO MORENO ARANTES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso, em 07/10/2024, às 15:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Cícero Célio de Figueiredo, Usuário Externo, em 07/10/2024, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por FABIANO ANDRE PETTER, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso, em 07/11/2024, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 7150225 e o código CRC 353C0BD4.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela proteção durante todo este percurso, por sempre acolher as minhas orações e acalmar o meu coração em situações difíceis.

Ao meu noivo, Marcelo, por ter segurado a minha mão durante esta jornada tão intensa que foi o mestrado. À minha mãe, Iliane, por sempre estar ao meu lado, dedicando todo apoio e amor incondicional, por não me deixar desistir e sempre estar de braços abertos para me acolher. Ao meu padrasto, Elemar, e meu irmão, Lucas, que nunca mediram esforços para me auxiliar nas mais diversas situações durante este período. Ao meu pai, Eliseu, pelo apoio e carinho a mim dedicados. Ao meu tio, Ivo, que mesmo longe sempre se fez presente, incentivando e prestando todo o apoio e suporte necessários.

Aos amigos, colegas e professores por todas as experiências compartilhadas nesta jornada, e por todo auxílio prestado no decorrer deste trabalho.

À Embrapa, por abrir as portas da empresa para a realização desta pesquisa, à minha estimada coorientadora Fabiana, por ter me acolhido e me ajudado a chegar até aqui, ao meu orientador Fabiano, e ao meu colega Jucelin, por todos os ensinamentos e suporte para que este trabalho fosse possível.

A todos, o meu Muito Obrigada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biochar de lodo de esgoto utilizado no experimento. (A): Peneira de malha 4,75mm, utilizada para peneirar o material processado. (B): Biochar após processamento. (C): biochar sendo preparado para aplicação ao solo, passando-o em peneira de 4,75 mm. 24

Figura 2: Gráfico de granulometria em reação aos diferentes tipos de biochar obtidos. 25

Figura 3. Fósforo (a), potássio (b) cálcio (c) e magnésio (d) em solo manejado com biochar obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média Scott-Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. 36

Figura 4. Matéria orgânica (a), capacidade de troca catiônica (b) saturação por bases (c) e saturação por alumínio (d) em solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Os dados do parâmetro m% foi transformado pela equação raiz (x+1) para realização do teste de média. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. 39

Figura 5. pH em água (a), pH em CaCl_2 (b) acidez potencial (c) e alumínio trocável (d) em solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. 42

Figura 6. Concentração foliar de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) em Rúcula sob solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Os dados do parâmetro nitrogênio e ferro foram transformados pela equação raiz (x+1) para realização do teste de média. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. 44

Figura 7. Concentração foliar de boro (a), cobre (b), ferro (c), manganês (d) e zinco (e) em Rúcula sob solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. 46

Figura 8. Número de folhas (a), altura de plantas (b), rendimento de massa verde (c) e rendimento de massa seca (d) em Rúcula sob solo manejado com biochar obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Os dados dos parâmetros rendimento de massa verde e seca foram transformados pela equação raiz (x+1) para realização do teste de média. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística

entre tratamentos, seguindo o teste de média Scott-Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do lodo de esgoto.....	22
Tabela 2: Tempos e temperaturas de processamento do lodo.....	23
Tabela 3: Características físicas do Biochar obtido.....	24
Tabela 4: Propriedades químicas do biochar.	26
Tabela 5: Tratamentos de acordo com as características de processamento de cada Biochar obtido.....	27
Tabela 6: Parâmetros Composto Carolina Soil.....	27
Tabela 7: Características do solo	29

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
RESUMO.....	16
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO	20
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.1 Área de estudos	22
2.2 Produção de <i>biochar</i> pelo processo de pirólise	22
2.3 Análise de parâmetros físico-químicos do <i>biochar</i>	24
2.4 Delineamento e condução experimental	27
2.5 Condução do experimento e análises laboratoriais	29
2.6 Análise estatística	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.1 Parâmetros biométricos e produtividade da rúcula	32
3.2 Efeitos do <i>biochar</i> de lodo de esgoto nas propriedades químicas do solo	34
3.3 Teores de nutrientes nas folhas de rúcula	42
4. CONCLUSÃO.....	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

INTRODUÇÃO GERAL

A interferência humana no meio ambiente tem acarretado impactos significativos, especialmente devido ao aumento da expansão urbana e por consequência à grande quantidade de resíduos gerados. O esgoto doméstico é um exemplo, pois no Brasil somente 52,2% do montante de esgoto gerado, recebe algum tipo de tratamento (SNIS, 2022). Dessa forma, observa-se a necessidade em se criar processos para o tratamento dos resíduos orgânicos, a fim de que retornem ao ambiente, com o objetivo de reduzir a degradação ambiental com o descarte incorreto (Alonso, 2022).

O tratamento dos resíduos orgânicos é essencial para a sustentabilidade ambiental, com foco principalmente no esgoto doméstico, que é composto, em sua maioria, por restos de alimentos na forma de dejetos ricos em nutrientes e matéria orgânica. Porém, também apresenta contaminação com produtos de higiene pessoal e farmacêuticos (Wu *et al.*, 2012; Mercl *et al.*, 2021), sendo essencial o encaminhamento para estações de tratamento de efluentes (ETEs) para a segurança na sua utilização, independente do uso.

O tratamento dos efluentes é uma forma sustentável para a remoção dos poluentes contidos e o método utilizado varia de acordo com a natureza física, química e biológica dos constituintes que os compõem (Leão *et al.*, 2020).

As estações de tratamento de efluentes (ETE's) são divididas nas seguintes etapas: (1) Tratamento Preliminar: remove sólidos grosseiros e areia; (2) Tratamento Primário: remove sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica; (3) Tratamento Secundário: utiliza mecanismos biológicos para remover matéria orgânica suspensa e dissolvida, e nutrientes

como nitrogênio e fósforo; (4) Tratamento Terciário: remove nutrientes, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados e sólidos inorgânicos dissolvidos (Moreira, 2018). Esses processos geram subprodutos como areia, sólidos e lodo de esgoto, que devem ser tratados e destinados adequadamente.

O método mais utilizado pelas estações de tratamento no Brasil é denominado “lodos ativados” e consiste em um sistema em que uma massa biológica cresce e forma flocos, que são recirculados e colocados em contato com a matéria orgânica em um ambiente aeróbico, caracterizado pela apresentação de duas fases, uma líquida e outra sólida (Oliveira et al., 2016). O produto gerado pela fase sólida do esgoto doméstico é conhecido como lodo de esgoto, que pode ser submetido a processos de sanitização, assim sendo reaproveitado de diversas formas, como fonte de nutrientes e matéria orgânica para os solos ou ainda na composição de substratos para produção de mudas (Silva et al., 2017). Entretanto, sua utilização deve ser vinculada às características do material após o processamento, uma vez que este deve estar livre de contaminantes biológicos e apresentar teores de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) aceitáveis, de acordo com a legislação ambiental vigente (Brasil, 2020).

Dessa forma, o tratamento e a reciclagem do lodo de esgoto podem ser considerados um bom exemplo de inovação sustentável, em prol da obtenção de novos materiais (Hirata et al., 2022). Nomeadamente como biossólidos, é uma categoria que vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, estando em alta como um produto da economia circular (Lu et al., 2012).

Uma das formas de processamento do lodo de esgoto é a transformação e produção do *biochar* para posterior utilização em cultivos agrícolas. O *biochar* é produzido por pirólise, que é um método de termodegradação parcial da matéria orgânica, que ocorre quando a mesma é aquecida sob a ausência ou em baixa concentração de oxigênio (Rocha et al., 2009). Durante o processamento de pirólise a matéria prima é processada em elevadas temperaturas, geralmente entre 300°C e 700°C (Lehmann e Joseph, 2015)

O principal constituinte do *biochar* são os compostos de carbono aromáticos, que são altamente estáveis. Essa estabilidade torna o *biochar* uma forma eficiente de sequestro de carbono a longo prazo, devido à sua resistência à degradação bioquímica e à recalcitrância do material (Winsley, 2007). Entretanto, ao reagir química e biologicamente no solo, o *biochar* também se torna reativo, resultando em um material com efeito condicionador, que pode otimizar os processos relacionados aos sistemas produtivos agrícolas.

Assim, o processamento de lodo de esgoto via pirólise é um método promissor de tratamento, para redução do potencial poluidor, diminuindo o volume de lodo a ser depositado nos solos e, principalmente, eliminar contaminantes biológicos devido às altas temperaturas envolvidas no processo. Este processamento irá resultar em um produto que pode ser usado com segurança para fertilizar e condicionar solos agrícolas (Paz-Ferreiro et al., 2018).

Este estudo também ressalta a relevância da destinação adequada do lodo de esgoto, alinhando-se com os princípios da economia circular. Nesse contexto, a utilização do *biochar* como produto derivado do lodo de esgoto não só oferece uma solução ambientalmente sustentável para a gestão de resíduos, mas também promove a valorização de subprodutos e

a melhoria da qualidade do solo, contribuindo para um sistema mais eficiente e integrado de gestão de recursos.

Além das vantagens agrônômicas e ambientais, o uso do *biochar* nas suas diferentes matérias primas é um método promissor que se adere positivamente aos diversos segmentos da sociedade, sendo relacionado através de alguns dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (Figura 1).

Figura 1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas.



Fonte: elaborado pela autora, figuras obtidas a partir da ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2024).

Em síntese, a hipótese deste trabalho é que a aplicação de *biochar* produzido a partir de lodo de esgoto, submetido a diferentes tempos e temperaturas de pirólise, melhorará a performance agrônômica da rúcula (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.) em comparação ao solo não tratado. Especificamente, é esperado que condições otimizadas de pirólise (em termos de tempo e temperatura) resultem em um biochar com propriedades físico-químicas mais favoráveis, aumentando a retenção de nutrientes e água, e promovendo o crescimento e desenvolvimento da planta de forma mais eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, R. Economia circular e perspectivas da compostagem foram temas de seminário virtual. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2021/08/24/economia-circular-e-perspectivas-da-compostagem-foram-temas-de-seminario-virtual/>. Acesso em: 18 maio 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, p. 81-84, 30 dez. 2009.

HIRATA, D.; KINIESS, C. T.; CORTESE, T. T. P.; QUONIAM, L. O uso de informações patentárias para a valorização de resíduos industriais: o caso do lodo de tratamento de esgoto doméstico. Revista de Ciências da Administração. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/2735/273543309005.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2023.

LEÃO, M. B. Avaliação do Sistema de Tratamento de Esgoto do Restaurante Universitário Unipampa-Caçapava do Sul. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 8, n. 3, 2020.

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

MERCL, F.; KOSNAR, Z.; MARIK, P.; VOJTISEK, M.; DUSEK, J.; SZAKOVA, J.; TLUSTOS, P. Pyrolysis of Biosolids as an Effective Tool to Reduce the Uptake of Pharmaceuticals by Plants. J. Hazard. Mater., v. 405, p. 124278, 2021.

OLIVEIRA, D. D. N. Produção de Blocos de Concreto Empregando Efluente Tratado por Lodos Ativados e por Lagoas de Estabilização. *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 4, p. 1054-1066, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 20 jun. 2024.

PAZ-FERREIRO, J.; NIETO, A.; MÉNDEZ, A.; ASKELAND, M.; GASCÓ, G. Biochar from biosolids pyrolysis: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 15, p. 956, 2018.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M. M.; CORTEZ, L. A. B. Aplicação dos Produtos da Pirólise Rápida de Biomassa como Fertilizante Natural. *Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. Cap. 13, p. 397-408.

SILVA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; MINOGUE, P.; REIS, A. F.; MOLINE, E. F. V. Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 47, n. 01, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/s7jLZj5f5PtyJQRq4R8FJCw/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 7 jul. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto – 2022.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

WINSLEY, P. Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zealand Science Review*, v. 64, n. 1, p. 5-10, 2007.

WU, C.; SPONGBERG, A. L.; WITTER, J. D.; SRIDHAR, B. B. M. Transfer of Wastewater Associated Pharmaceuticals and Personal Care Products to Crop Plants from Biosolids Treated Soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 85, p. 104–109, 2012.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: TEMPO E TEMPERATURA DE PIRÓLISE NA PERFORMANCE AGRONÔMICA DA RÚCULA (*ERUCA vesicaria* (L.) CAV.)

O biochar tem sido considerado uma opção sustentável para o aproveitamento agrícola do lodo de esgoto (LE). Contudo, ainda existem lacunas quanto aos impactos nutricionais do *biochar* em culturas de ciclo curto. Portanto, este estudo consiste na investigação do efeito do *biochar* derivado do lodo de esgoto, produzido em diferentes condições de pirólise, na performance agronômica da rúcula (*ERUCA vesicaria* (L.) CAV.). O Lodo de Esgoto (LE) *in natura* foi processado em reator de pirólise de batelada em duas temperaturas (400°C e 500°C) e em dois tempos de residência (1h e 2h), com uma taxa média de aumento de temperatura de 4,5°C min⁻¹. Um experimento foi instalado em casa de vegetação, cujo delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com 10 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos foram constituídos pelas seguintes doses de *biochar*: 20 e 30 Mg/ha para cada tipo de *biochar* obtido (de acordo com os parâmetros de processamento). Essas quantidades de *biochar* foram incorporadas a 1kg de solo em recipientes com capacidade de 1 dm³, juntamente com a dose de adubação NPK recomendada para a cultura considerando solos com baixo teor de nutrientes e matéria orgânica (N – 100kg/ha; P – 40 kg/ha; K – 90 kg/ha). Além disso, foi empregado um tratamento padrão utilizando o composto Carolina Soil, com o propósito de estabelecer parâmetros de comparações entre os diferentes tratamentos avaliados. Foram avaliadas propriedades químicas do solo, antes e após o cultivo

do rabanete. O desenvolvimento agrônômico da cultura foi avaliado por meio das variáveis: número de folhas, altura da planta, massa verde e massa seca da parte aérea. Bem como, as concentrações de nutrientes no solo e nas plantas. Os resultados mostraram que a adição de biochar ao solo, independentemente do tempo e da temperatura de pirólise, aumentou significativamente os níveis de fósforo e melhorou os valores de matéria orgânica. Embora a adição de biochar de lodo de esgoto tenha aumentado a acidez do solo, isso não afetou negativamente o cultivo da rúcula, que apresentou um crescimento adequado mesmo em condições de pH mais ácido.

Palavras-chaves: Pirólise. Hortaliças. Resíduos orgânicos.

ABSTRACT
Master Dissertation

SEWAGE SLUDGE BIOCHAR: IMPACT OF PYROLYSIS TIME AND TEMPERATURE VARIATION ON ARUGULA AGRONOMIC PERFORMANCE

Biochar has been considered a sustainable option for the agricultural use of sewage sludge (SS). However, gaps still exist regarding the nutritional impacts of biochar on short-cycle crops. Therefore, this study investigates the effect of biochar derived from sewage sludge, produced under different pyrolysis conditions, on the agronomic performance of arugula (*ERUCA vesicaria (L.) CAV.*). Raw sewage sludge (SS) was processed in a batch pyrolysis reactor at two temperatures (400°C and 500°C) and two residence times (1 hour and 2 hours), with an average heating rate of 4.5°C min⁻¹. A greenhouse experiment was conducted using a completely randomized design with 10 treatments and four replications. The treatments consisted of the following biochar doses: 20 and 30 Mg.ha⁻¹ for each type of biochar obtained (according to the processing parameters). These amounts of biochar were incorporated into 1 kg of soil in containers with a capacity of 1 dm³, along with the minimum recommended NPK fertilization dose for the crop (N – 100 kg/ha; P – 40 kg/ha; K – 90 kg/ha). Additionally, a standard treatment using Carolina Soil was employed to establish comparison parameters among the different treatments evaluated. Soil chemical properties were assessed before and after the cultivation of arugula. Agronomic development of the crop was evaluated through variables such as the number of leaves, plant height, fresh and dry mass of the aerial part, as

well as nutrient concentrations. The results showed that the addition of biochar to the soil, regardless of pyrolysis time and temperature, significantly increased phosphorus levels and improved organic matter content. Although the addition of sewage sludge biochar made the soil more acidic, arugula demonstrated tolerance to the lower pH and exhibited adequate growth.

Keywords: Pyrolysis. Vegetables. Organic waste.

1. INTRODUÇÃO

O lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto tende a aumentar de acordo com o crescimento populacional. Isso ressalta a importância de uma destinação adequada, visando proteger o meio ambiente e a saúde pública. No Brasil, ainda existem sérios problemas relacionados ao tratamento de esgotos e à destinação final do lodo (TRATA BRASIL, 2022).

A composição química e biológica do lodo de esgoto varia em função do tipo de tratamento aplicado (primário, lodo ativado, decantadores, reatores biológicos, lagoas de estabilização), localização da estação de tratamento de esgoto (ETE), período do ano e tipo de descarga. De maneira geral, o lodo de esgoto possui um alto teor de matéria orgânica e elementos químicos que podem ser utilizados como nutrientes aos cultivos agrícolas (Bettiol & Camargo, 2006). No entanto, o reaproveitamento do lodo de esgoto, deve seguir a legislação, para garantir a ausência de contaminantes biológicos e teores de EPTs dentro dos limites estabelecidos pela legislação ambiental (Brasil, 2020).

Uma das formas de processamento do lodo de esgoto é o tratamento termoquímico através da pirólise para obtenção de *biochar*, pois trata-se de uma alternativa ambientalmente adequada para destinação deste resíduo de acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei 12.305/10 (Brasil, 2010).

A pirólise é um método de termodegradação parcial da matéria orgânica, que ocorre através do aquecimento da biomassa sob presença controlada ou ausência de oxigênio (Rocha, 2009). Durante o processamento via pirólise a matéria prima é processada em temperaturas que variam de 250 °C a 700°C (Chhiti; Kemiha, 2013), e são gerados três tipos de produtos (líquido, sólido e gasoso) que são produzidos em diferentes proporções a partir do rompimento das ligações, levando à obtenção de produtos com capacidade energética e propriedades melhores do que aquelas da matéria-prima inicial (Vieira, 2004). A temperatura, a taxa de aquecimento e o tempo de residência da biomassa são os principais parâmetros que influenciam significativamente a composição e o rendimento dos produtos obtidos (Bridgwater, 2012).

O resultado será um produto passível de uso em sistemas agrícolas, sempre respeitando as normas atuais da legislação. O *biochar*, produto obtido da pirólise, é muito estável e rico em carbono, o que ajuda a melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, a produtividade vegetal (Fischer et al., 2019).

A utilização do LE como matéria prima para a produção do *biochar* (BLE) pode ser uma boa alternativa tanto ambiental, quanto do ponto de vista agrícola, uma vez que o BLE pode melhorar as características do solo e aumentar a produtividade das culturas (Chagas et al, 2021) e na composição de substratos para produção de mudas (Silva et.al, 2022).

A escolha da rúcula como espécie de estudo é motivada por sua resposta rápida às condições do solo, seu ciclo de vida curto e sua importância como cultura alimentar (Figueira, 2000). Portanto, este estudo consiste na investigação do efeito do *biochar* derivado do lodo de esgoto, produzido em diferentes condições de pirólise, na performance agrônômica da

rúcula. Avaliar como diferentes parâmetros de pirólise afetam as propriedades do *biochar* e, subsequentemente, a performance da rúcula, pode fornecer *insights* valiosos para a otimização do processo de produção e o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudos

O trabalho foi conduzido no campo experimental da Embrapa Agrossilvipastoril, localizado nas coordenadas geográficas 11°51' de latitude sul e 55°35' de longitude oeste, no município de Sinop, MT. A região está inserida em área de transição entre os biomas Cerrado e Floresta Amazônica (Haidar et al., 2013). A classificação climática é Aw, segundo Köppen-Geiger, com temperatura média de 26,5°C, clima tropical de baixa pluviosidade no inverno (maio a setembro) e com verão chuvoso (outubro a abril) (AB'SABER, 2003).

2.2 Produção de *biochar* pelo processo de pirólise

O lodo de esgoto (LE) processado foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Sinop operado pela empresa Águas de Sinop/Aegea, localizada em Sinop/MT. Esta ETE utiliza o sistema de tratamento em nível secundário por lodos ativados e tanques de decantação, no qual o lodo é tratado em digestores aeróbios os quais têm a função de estabilizar a matéria orgânica. O lodo utilizado foi coletado em leito de secagem e algumas propriedades deste material podem ser verificadas na Tabela 1, fornecida pela empresa Águas de Sinop/Aegea.

Tabela 1: Características do lodo de esgoto

Parâmetros	Unidade	Valor
------------	---------	-------

Porcentagem de Sólidos Totais	% p/p	21
Carbono Orgânico Total	% p/p	19,1
Fósforo	mg/kg	2.750
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg/kg	1.150
pH em H₂O	---	5,5
Potássio	mg/kg	393
Sódio	mg/kg	547
Enxofre	mg/kg	5.180
Cálcio	mg/kg	12.500
Magnésio	mg/kg	2.190
Umidade	% p/p	10
Sólidos Totais	% p/p	21
Sólidos Voláteis	% p/p	13
Bário	mg/kg	42,5
Chumbo	mg/kg	8,16
Cobre	mg/kg	213
Cromo	mg/kg	27,3
Mercúrio	mg/kg	0,454
Molibdênio	mg/kg	1,67
Níquel	mg/kg	12,6
Zinco	mg/kg	20,3

Fonte: Aegea – Águas de Sinop

Foi utilizado em média 9 kg de biomassa de Lodo de Esgoto (LE) *in natura* para cada batelada, e posteriormente processado em reator de pirólise de batelada em duas temperaturas (400°C e 500°C) e em dois tempos de residência (1h e 2h), conforme dados mostrados na Tabela 02. A pirólise foi realizada a uma taxa média de aumento de temperatura de 4,5°C min⁻¹. E para cada 9 kg de LE *in natura* processado, obteve-se em média 4,5 kg de *Biochar* de Lodo de Esgoto (BLE).

Tabela 2: Tempos e temperaturas de processamento do lodo.

Biochar	Tempo	Temperatura
B1	1 hora	400 °C
B2	2 horas	400 °C
B3	1 hora	500 °C
B4	2 horas	500 °C

Após o processamento, o *biochar* foi peneirado em peneira com malha de 4,75 mm e acondicionado separadamente de acordo com cada parâmetro de processamento (Figura 01).



Figura 1 - *Biochar* de lodo de esgoto utilizado no experimento. (A): Reator de pirólise batelada, utilizada para processar o material. (B): Lodo de esgoto *in natura*. (C): *Biochar* sendo preparado para aplicação ao solo, passado em peneira de 4,75 mm.

2.3 Análise de parâmetros físico-químicos do *biochar*

Após seu processamento os materiais obtidos foram caracterizados físico e quimicamente nas diferentes condições de pirólise (Tabelas 03 e 04). Os parâmetros utilizados para a caracterização do *biochar* foram a condutividade elétrica, umidade a 105°C, teor de cinzas, matéria orgânica, granulometria (IBI - *Biochar Standards V2.0*) densidade de partículas e pH em H₂O e CaCl₂ (EBC - *European Biochar Certificate V4.8*).

Tabela 3: Características do *Biochar*

Parâmetro	B1	B2	B3	B4
Densidade de Partícula (g/cm ³)	0,640	0,606	0,582	0,603
pH em H ₂ O	5,570	5,640	5,83	6,005
pH em CaCl ₂	5,495	5,425	5,665	5,810
Condutividade elétrica ((mS/cm)	49,050	68,800	72,75	74,650
Umidade (%)	0,060	0,040	0,047	0,034
Matéria Seca (%)	99,940	99,959	99,952	99,965
Sólidos Voláteis (%)	0,612	0,591	0,783	0,591
Teor de Cinzas (%)	49,424	49,451	49,173	49,397

B1: Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 400°C durante 1 hora; **B2:** Lodo de esgoto processado em pirólise a 400°C durante 2 horas; **B3:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 500°C durante 1 hora; **B4:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 500°C durante 2 horas.

A análise granulométrica está apresentada na Figura 02. Para esta análise utilizou-se a série de cinco peneiras afim de avaliar a distribuição dos tamanhos de partículas dos materiais obtidos nos diferentes parâmetros de processamento.

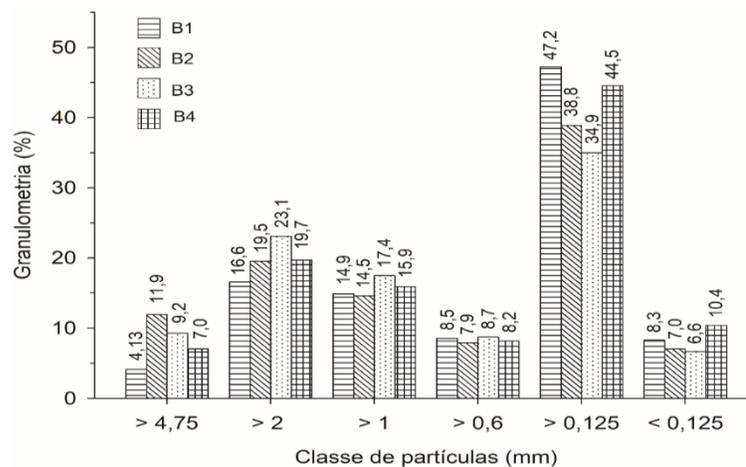


Figura 2: Gráfico de granulometria em relação aos diferentes tipos de *biochar* obtidos. **B1:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 400°C durante 1 hora; **B2:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 400°C durante 2 horas; **B3:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 500°C durante 1 hora; **B4:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 500°C durante 2 horas.

Na caracterização química, os macros e micronutrientes foram analisados de acordo com as metodologias do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2017) e estão apresentados na Tabela 04. Cada nutriente foi avaliado em três formas de extração: Teor Total, Solubilidade em Citrato Neutro de Amônio (CNA) e Água (H₂O) e Solubilidade em Ácido Cítrico 2% (AC CIT 2%). Para o nitrogênio, foi realizada a extração total com a solução de ácido nítrico (HNO₃) e ácido clorídrico (HCl).

A metodologia de Teor Total envolveu a digestão ácida da amostra com ácido nítrico (HNO₃) e ácido clorídrico (HCl) para determinação de P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe e Mn, e com ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido nítrico (HNO₃) para determinação de S e H.

A concentração de cada nutriente na solução, para as três formas de extração, foi determinada através de espectrofotometria.

Tabela 4: Propriedades químicas do *biochar*.

	B1	B2	B3	B4
Metodologia	TEOR TOTAL			
N (g/kg)	13,73	14,01	10,78	13,30
P (g/kg)	6,66	7,53	8,43	9,18
K (g/kg)	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca (g/kg)	6,00	6,46	6,29	6,38
Mg (g/kg)	1,05	1,74	1,03	1,33
S (g/kg)	2,42	3,06	4,12	1,53
B (mg/kg)	33,76	42,66	29,31	17,89
Cu (mg/kg)	402,47	398,33	483,77	481,58
Fe (mg/kg)	30767,66	32863,84	46692,13	45211,79
Mn (mg/kg)	35,00	47,93	47,38	49,30
Zn (mg/kg)	304,40	310,80	347,17	397,10
Metodologia	SOLUVEL EM CNA+H2O			
N (g/kg)	–	–	–	–
P (g/kg)	5,46	5,42	3,28	5,98
K (g/kg)	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca (g/kg)	4,69	5,44	5,17	6,00
Mg (g/kg)	0,44	0,80	0,42	0,78
S (g/kg)	2,21	1,37	0,98	0,84
B (mg/kg)	0,00	0,00	26,34	0,00
Cu (mg/kg)	5,26	14,12	7,73	1,19
Fe (mg/kg)	18310,66	15047,65	11381,76	17522,37
Mn (mg/kg)	33,99	24,93	21,42	22,95
Zn (mg/kg)	200,60	156,54	83,33	143,95
Metodologia	SOLUVEL EM AC CIT 2%			
N (g/kg)	–	–	–	–
P (g/kg)	0,25	0,12	0,46	0,84
K (g/kg)	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca (g/kg)	3,27	3,14	3,24	4,16
Mg (g/kg)	0,11	0,09	0,36	0,43
S (g/kg)	0,07	0,01	0,19	0,14
B (mg/kg)	19,60	18,98	14,06	5,60
Cu (mg/kg)	6,69	3,49	52,23	25,66
Fe (mg/kg)	980,25	684,76	1487,86	1614,21

Mn (mg/kg)	4,51	5,27	18,76	6,48
Zn (mg/kg)	32,53	17,55	53,30	68,93

B1: Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 400°C durante 1 hora; **B2:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 400°C durante 2 horas; **B3:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 500°C durante 1 hora; **B4:** Lodo de esgoto processado em pirólise batelada a 500°C durante 2 horas.

2.4 Delineamento e condução experimental

Após a produção e caracterização do *biochar* obtido do lodo de esgoto, procedeu-se à condução do experimento destinado a avaliar o desempenho deste no desenvolvimento da rúcula, utilizada como planta teste.

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com 10 tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos pelas seguintes doses de *biochar*: 20 e 30 Mg.ha⁻¹ para cada tipo de *biochar* obtido (B1, B2, B3 e B4), correspondendo às seguintes porcentagens de *biochar* em relação à massa de solo (m/m): 1% e 1,5% (Tabela 5). Essas quantidades de *biochar* foram incorporadas a 1 kg de solo em recipientes com capacidade de 1 dm³, juntamente com a dose mínima de adubação NPK recomendada para cultura (N – 100kg/ha; P – 40 kg/ha; K – 90kg/ha) de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2004).

Tabela 5: Tratamentos de acordo com as características de processamento de cada *Biochar* obtido.

Tratamento	Temperatura BLE	Tempo BLE	Dose BLE	Adubação NPK
T1 (Solo - Controle)	--	--	--	--
T2	400 °	1 hora	20 Mg/ha	Dose mínima
T3	400 °	1 hora	30 Mg/ha	Dose mínima
T4	400 °	2 horas	20 Mg/ha	Dose mínima
T5	400 °	2 horas	30 Mg/ha	Dose mínima

T6	500 °	1 hora	20 Mg/ha	Dose mínima
T7	500 °	1 hora	30 Mg/ha	Dose mínima
T8	500 °	2 horas	20 Mg/ha	Dose mínima
T9	500 °	2 horas	30 Mg/ha	Dose mínima
T10 (Padrão)	--	--	30 Mg/ha	Dose mínima

T1: Solo (tratamento controle); **T2:** BC400° - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BC400° - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BC400° - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BC400° - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BC500° - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BC500° - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BC500° - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BC500° - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK(tratamento padrão).

Além disso, foi empregado um tratamento padrão utilizando o composto Carolina Soil(Tabela 06) com o propósito de estabelecer comparações entre os diferentes tratamentos avaliados.

Tabela 06: Parâmetros do composto Carolina Soil

Parâmetro	Unidade	BASE	IN
		SECA	NATURA
pH CaCl ₂ 0,01 M (Ref. 1:2,5)	--	5,7	ns
Densidade	g/dm ³	0,2	ns
Umidade à 60-65°C	%	56,8	ns
Matéria Orgânica Total	%	68,76	29,7
Matéria Orgânica Compostável (Titulação)	%	12,78	5,52
Matéria Orgânica Resistente a Compostagem	%	55,98	24,18
Carbono Total (Orgânico e Mineral)	%	39,98	17,27
Carbono Orgânico	%	7,43	3,21
Resíduo Mineral Total	%	31,24	13,5
Relação C/N (C Total e N Total)	--	70	70
Relação C/N (C Orgânico e N Total)	--	13	13
Nitrogênio Total	%	0,57	0,25
Fósforo Total (P ₂ O ₅ Total)	%	0,32	0,14
Potássio (K ₂ O Total)	%	0,51	0,22
Cálcio (Ca Total)	%	0,62	0,27
Magnésio (Mg Total)	%	4,89	2,11
Enxofre (S Total)	%	0,16	0,07
Boro (B Total)	mg/Kg	15,75	6,8
Cobre (Cu Total)	mg/Kg	35,95	15,53
Ferro (Fe Total)	mg/Kg	18077,5	7809,48

Manganês (Mn Total)	mg/Kg	203,33	87,84
Zinco (Zn Total)	mg/Kg	55,7	24,06
Sódio (Na Total)	mg/Kg	445,67	192,53
Molibdênio (Mo Total)	mg/Kg	40,66	17,57
Alumínio (Al Total)	mg/Kg	18801,38	8122,2

Parâmetros do composto Carolina Soil utilizado para comparação dos parâmetros de Biochar.

2.5 Condução do experimento e análises laboratoriais

O solo utilizado no ensaio foi Latossolo Vermelho, com textura argilosa, cujas características estão descritas na Tabela 06. Para a avaliação do ensaio de campo utilizou-se como planta teste a rúcula (*Eruca vesicaria*), hortaliça folhosa pertencente à família Brassicaceae, e foram realizadas avaliações com relação ao seu desenvolvimento.

Tabela 7: Características do solo

Parâmetro	Unidade de Medida	Valor
pH H ₂ O	mg/dm ³	6,4
pH CaCl ₂	mg/dm ³	5,5
K	mg/dm ³	156,05
S	mg/dm ³	10
K	cmolc/dm ³	0,4
Ca	cmolc/dm ³	3,45
Mg	cmolc/dm ³	1
Al	cmolc/dm ³	0
H+Al	cmolc/dm ³	2,45
M.O.	g/kg	27,9
C.O.	g/kg	16,15
B	mg/dm	0,265
Cu	mg/dm ³ (MEHLICH)	1,15
Fe	mg/dm ³ (MEHLICH)	113,5
Mn	mg/dm ³ (MEHLICH)	9,5
Zn	mg/dm ³ (MEHLICH)	4,4
V%	%	67,4
m%	%	0
Ca/Mg	Relações	3,55
Ca/K	Relações	15,05

Mg/K	Relações	4,25
Ca/T	%	49,05
Mg/T	%	13,9
K/T	%	4,4
SB	cmolc/dm ³	4,875
T	cmolc/dm ³	7,32
t	cmolc/dm ³	4,875

O experimento foi realizado em casa de vegetação com controle de temperatura (média de 25°C) e umidade (média de 60 %), onde os vasos com os tratamentos foram submetidos a incubação durante um período de 06 dias para melhor assimilação dos tratamentos. Após incubação, a Rúcula, Folha Larga (Horticeres sementes – linha Platina), foi semeada diretamente em vaso no dia 12 de fevereiro de 2024, com cinco sementes por vaso. Durante o ciclo da cultura foram realizadas irrigações diárias (em média 60 mL de água por vaso) e realizado monitoramento com relação ao ataque de pragas, a fim de manter as plantas saudias até o final do ciclo.

Aos 30 dias após a germinação, procedeu-se à colheita da rúcula, seguida da avaliação dos seguintes parâmetros: número de folhas, altura da planta, massa fresca e massa seca da parte aérea afim de estabelecer critérios de análise de produtividade.

Os parâmetros altura da planta e comprimento da folha foram medidos utilizando um paquímetro digital. A contagem direta foi adotada para determinar o número de folhas, enquanto a medição da massa fresca e seca da parte aérea seguiu o protocolo descrito por Boaretto et al. (2009). Esse método envolve acondicionar a massa fresca da parte aérea em sacos de papel, deixando-a em estufa por 72 horas a 60°C, e, posteriormente, efetuar a pesagem com o auxílio de uma balança de precisão. A produtividade foi determinada através

do peso seco da parte aérea da planta, considerando um espaçamento de 15 cm entre linhas e 5 cm entre plantas e um total de 1.320.000 plantas por hectare.

Para a análise foliar, os teores de macro e micronutrientes foram determinados de acordo com a metodologia estabelecida por Malavolta (1997). O nitrogênio (N) foi avaliado por meio da análise *semi-micro-Kjeldahl*. O fósforo (P) foi quantificado por colorimetria do metavanadato. O potássio (K) foi analisado por espectrometria de absorção atômica, após a oxidação do material vegetal pela digestão nítrico-perclórica, o potássio foi quantificado por espectrofotômetro de absorção atômica. O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, seguindo o mesmo princípio utilizado para o potássio. O enxofre (S) foi medido por turbimetria do sulfato de bário. O boro (B) foi determinado através da colorimetria da azometina HO. Manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn) e ferro (Fe) foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, com uma análise direta no extrato nítrico-perclórico de vegetais.

Após a colheita da rúcula, o solo utilizado no experimento também foi analisado. Inicialmente, realizou-se a secagem ao ar. Em seguida, subamostras do solo seco foram selecionadas e passadas por uma peneira de malha 2 mm para determinar os teores de fósforo e potássio disponíveis, cátions trocáveis (cálcio e magnésio), componentes da acidez (Al^{3+} , $H^{+}Al^{3+}$, pH em $CaCl_2$) e capacidade de troca catiônica. As propriedades relacionadas à fertilidade do solo foram determinadas conforme a metodologia da Embrapa (1997).

2.6 Análise estatística

A normalidade e a homoscedasticidade dos dados foram testadas nas propriedades medidas, pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett ($p < 0,05$), respectivamente. Os valores foram reportados como médias e para avaliar diferenças entre tratamentos utilizou-se o Teste de *Scott-Knott* ($p < 0,05$) pelo programa *Sisvar* (v5.6). Os dados estatísticos foram plotados pelo programa *Sigma plot* (v10.0)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros biométricos e produtividade da rúcula

Com exceção do número de folhas, todos os demais parâmetros biométricos utilizados para análise deste estudo, apresentaram significativa melhoria com adição dos tratamentos ($p < 0,05$) (Figura 3). Com relação ao rendimento da massa fresca, os tratamentos apresentaram variações entre si, sendo que os tratamentos que apresentaram maior rendimento foram T2 (BLE1– 20 Mg/ha), T6 (BLE3– 20 Mg/ha), T8 (BLE4 – 20 Mg/ha) e T9 (BLE4 – 30 Mg/ha).

Estes resultados também foram observados em diversos estudos com diferentes tipos de *biochars* e culturas. Estudo de Fachini (2021) avaliou a produtividade do milho em função da aplicação de BLE e NPK, demonstrando que a aplicação do conjunto de BLE e NPK traz resultado satisfatório para a produtividade da cultura. Neves *et al.*(2015) verificaram a produtividade estimada do rabanete em resposta à dose de *biochar* de lodo de esgoto, testando doses de 20, 40, 60 e 100 Mg/ha, e verificaram que todas as doses adicionadas apresentaram melhoras nos parâmetros biométricos testados, sendo as doses de 20 a 40 Mg/ha as que mais apresentaram aumento da produtividade.

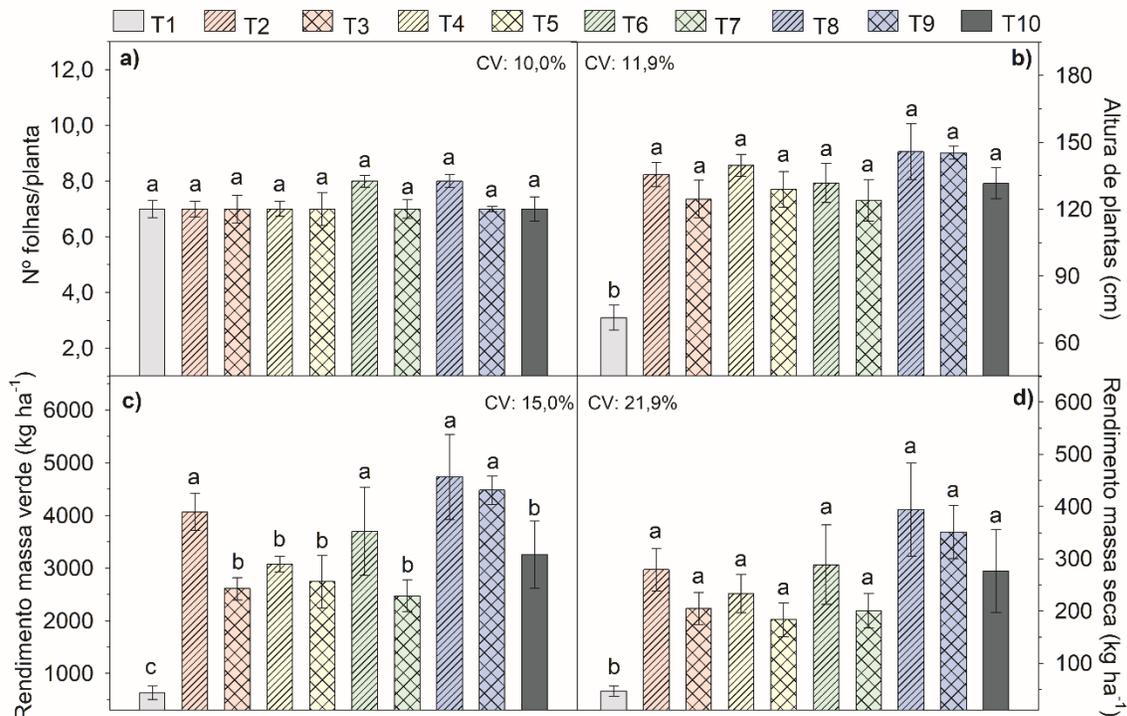


Figura 3. Número de folhas (a), altura de plantas (b), rendimento de massa verde (c) e rendimento de massa seca (d) em Rúcula sob solo manejado com biochar obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Os dados dos parâmetros rendimento de massa verde e seca foram transformados pela equação raiz $(x+1)$ para realização do teste de média. Letras diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média Scott-Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. **T1:** Solo (tratamento controle); **T2:** BLE1 400°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BLE400°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BLE400°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BLE400°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BLE500°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BLE500°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BLE500°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BLE500°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK (tratamento padrão).

De maneira geral, os efeitos dos tratamentos no desempenho vegetativo da cultura da rúcula foram positivos para todos os parâmetros estudados. Esse bom desempenho agrônômico apresentado pela cultura da rúcula com adição de BLE e NPK como fonte de nutrientes foi observado nas folhas da rúcula, como fósforo, nitrogênio e micronutrientes, os quais serão apresentados nos próximos tópicos.

3.2 Efeitos do *biochar* de lodo de esgoto nas propriedades químicas do solo

Com relação às propriedades químicas do solo, a disponibilidade de P foi a que teve maior destaque ($p < 0,05$; Figura 4). Todos os tratamentos com adição de BLE demonstraram aumento da disponibilidade de P em relação a testemunha, e o T9 (BLE4 30Mg/ha + NPK) foi o tratamento que apresentou maior teor de P disponível em relação aos demais tratamentos, até mesmo comparando ao tratamento padrão com adubação mineral. Já no T2 (BLE1 20 Mg/ha + NPK), a concentração de fósforo foi a menor, se comparado aos demais tratamentos que tiveram aplicação de BLE.

Estes resultados corroboram com o estudo de Gondek *et al.* (2019), o qual apresentou relação positiva significativa entre a quantidade de P disponível no solo e a quantidade de *biochar* adicionado, sendo que a maior dose, foi a que apresentou maior disponibilidade de P.

O alto teor de P disponível no solo, após adição de BLE, pode ser observado em diversos estudos (Farias *et al.*, 2018; Glaser e Lehr, 2019; Fachini *et al.*, 2021). O LE contém quantidades significativas de nutrientes valiosos para as plantas, incluindo N, P, K, Ca, Mg e S (Fischer e Glaser, 2012). De acordo com Glaser e Lehr (2019) a temperatura de pirólise pode influenciar nas propriedades do BLE em termos de disponibilidade de P, sendo que a maior diferença é percebida em processamentos com temperaturas entre 450°C e 600°C.

Diferentemente do P, o estudo revela que não houve aumento significativo no teor de K em resposta à adição de BLE. Esse fenômeno pode ser explicado pela ausência de teores de potássio disponível na composição do BLE, conforme indicado na Tabela 04. Em geral, o LE é caracterizado por apresentar baixos teores de potássio (Bettiol e Camargo, 2006).

Estudos recentes corroboram essas descobertas, demonstrando que a adição de BLE ao solo tem um impacto insignificante na disponibilidade de potássio (Farias *et al.*, 2018; Fachini *et al.*, 2021).

Neves *et al.* (2015) observaram que, somente a adição de uma dosagem de 100 Mg/ha de BLE foi suficiente para suprir a planta e aumentar o teor de K no solo, o que segundo os autores se torna inviável economicamente quando aplicado em escala de campo. O K sendo um cátion monovalente, é um elemento móvel, sendo assim facilmente lixiviado (Santana, 2012), por isso ele possivelmente foi perdido na porção líquida do lodo.

Pesquisas que promovam o enriquecimento dos lodos com K, utilizando preferencialmente fontes alternativas, como adubação orgânica com cinzas (Embrapa, 2007) ou adubação verde com gramíneas (Tubanã *et al.*, 2023) podem suprir essa necessidade. Pois conforme valores apresentados na Figura 4-b, mesmo com a adição da adubação mineral (NPK) aos tratamentos, os valores de K ficaram abaixo do ideal para o cultivo da rúcula que é em média 100 mg/dm³ (Vilar, 2023).

Para Ca e Mg trocável, os tratamentos com adição de *biochar* ficaram abaixo dos valores observados nos tratamentos controle (solo) e padrão (composto +NPK), com exceção do T3 (B1+NPK – 30Mg/ha), que se igualou ao tratamento controle quanto a disponibilidade de Ca ($p < 0,05$; Figura 4). No estudo de Monteiro *et al.* (2020) verificou-se que houve alteração dos teores de Ca e Mg com a adição de BLE ao solo. O estudo de Lorencetti (2022) apresentou reduções semelhantes com relação aos teores de Mg, ao adicionar BLE em doses similares ao solo.

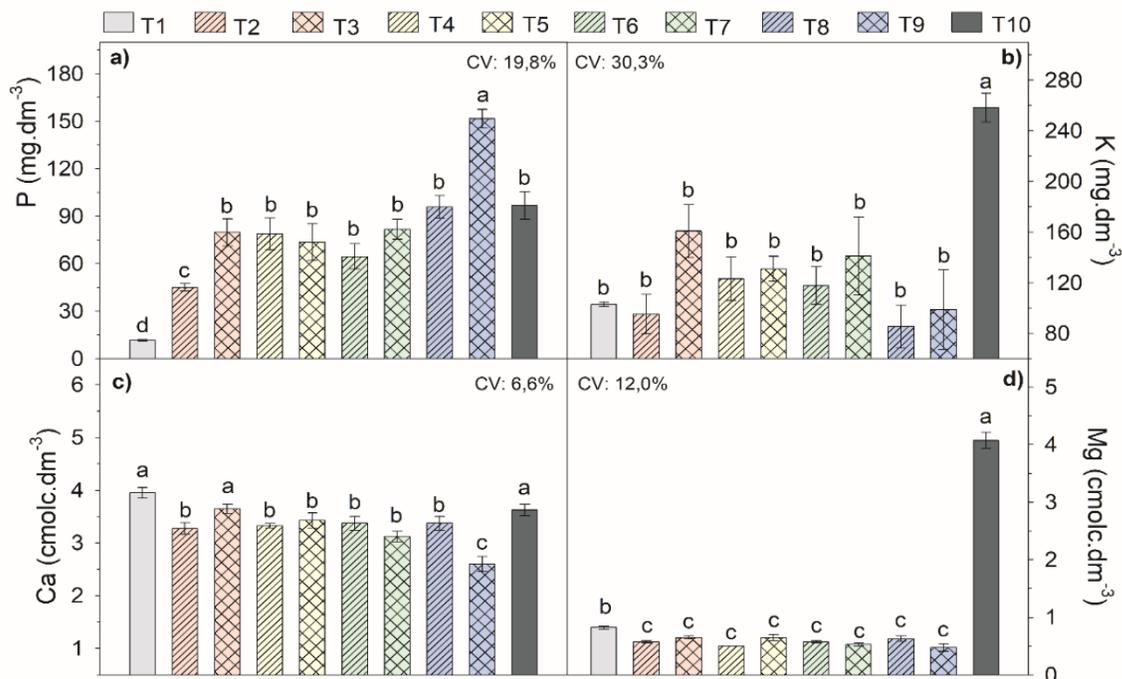


Figura 4. Fósforo (a), potássio (b) cálcio (c) e magnésio (d) em solo manejado com biochar obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média Scott-Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. **T1:** Solo (tratamento controle); **T2:** BLE400°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BLE400°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BLE400°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BLE400°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BLE500°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BLE500°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BLE500°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BLE500°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK (tratamento padrão).

Com relação aos indicadores de fertilidade do solo representados pela saturação por bases, CTC, matéria orgânica e a soma de bases ($P < 0,05$; Figura 05), pode-se verificar que os valores de saturação por bases (V) foram reduzidos com a adição dos tratamentos, apresentando valores inferiores se comparados ao tratamento controle e ao tratamento padrão ($P < 0,05$; Figura 05). Lancelotti (2022) obteve resultados semelhantes ao adicionar doses de 20 e 40 Mg/ha de LE ao solo.

Já com relação aos valores de M.O., pode-se verificar uma elevação do mesmo ao se adicionar BLE, pois quanto maior a dose de BLE aplicada ao solo, maiores foram os valores de matéria orgânica verificados.

A presença de matéria orgânica é fundamental para preservar a qualidade do solo, visto que contribui significativamente para melhoria das suas características biológicas, físicas e químicas. Essa preservação é crucial para garantir a sustentabilidade da produtividade agrícola ao longo do tempo (Fischer e Glaser, 2012). De maneira geral, a aplicação de BLE proporciona aumento da atividade bacteriana no solo (Mierzwa-Hersztek et al., 2017) e crescimento de microrganismos pela decomposição de compostos lábeis do solo (Luo et al, 2017). O estudo de Ahmed *et al.* (2021) também indicou melhora significativa na composição da comunidade bacteriana do solo, após adição de BLE.

A longevidade do *biochar* nos ecossistemas é uma questão importante, pois o CO² que não foi emitido durante a queima é sequestrado em matéria orgânica estável no solo, (Lehmann et al., 2015). Zhou et al. (2017) observaram um aumento de carbono na biomassa microbiana em aproximadamente 107 de um total de 413 estudos analisados, com a adição de *biochars* provenientes de diversas matérias-primas. Este aumento do C da biomassa microbiana é resultante do incremento de carbono lábil pela adição de *biochar* (Huang et al., 2012).

O *biochar* contém formas variadas de matéria orgânica que mineralizam em taxas diferentes, dependendo do ambiente e da comunidade microbiana (Joseph, *et al.*, 2018). A área de superfície do *biochar* é responsável por determinar seu potencial para reter água, nutrientes e interagir com micróbios e poluentes no meio ambiente. Quanto maior a área superficial do *biochar*, maior a probabilidade de ocorrer reações de adsorção e colonização

microbiana (Wyn et al., 2020). A análise granulométrica pode auxiliar na análise da área superficial do *biochar*, pois determina o tamanho e a forma das partículas. A área superficial específica pode aumentar à medida que as partículas se tornam menores. Na análise granulométrica realizada neste estudo, observou-se que os materiais obtidos a partir dos diferentes parâmetros de processamento apresentaram uma distribuição significativa das partículas. Especificamente, mais de 40% do material analisado foi encontrado nas frações granulométricas compreendidas entre a peneira de 0,6 mm e 0,125 mm. Isso indica uma predominância de partículas de tamanho médio, o que pode influenciar diretamente as propriedades físicas e químicas do material, como a área superficial específica e a capacidade de adsorção.

Quanto a CTC, constatou-se aumento dos valores na adição da maior quantidade de BLE produzido a 400°C, com relação ao tratamento controle, sendo que o tempo de processamento neste caso não teve influência ($p < 0,05$; Figura 5). Mesmo assim, ainda ficou abaixo dos valores de CTC verificados no tratamento com adubação mineral. Esses resultados corroboram os encontrados por Fachini (2021), onde os BLEs produzidos com a menor temperatura foram os que apresentaram maiores níveis de CTC do solo, com relação ao tratamento controle. Da mesma forma, Farias *et al* (2018) verificou que a adição de BLE ao solo, no primeiro ano de análise, não teve efeito significativo nos índices de CTC.

Para que ocorra aumento da CTC do solo, a superfície do BLE deve ser oxidada para que grupos de carboxilatos de cargas negativas sejam produzidos, sendo assim BCs produzidos sob temperaturas mais baixas são os mais promissores para contribuir com a CTC do solo, pois são mais facilmente oxidáveis (Novak et al., 2009). A pesquisa realizada por Jien & Wang (2013) verificaram aumento da CTC do solo de acordo com o aumento da dose

de BLE aplicado. Isso explica o fato de os tratamentos T3 e T5 ($p < 0,05$; Figura 5) serem os que apresentaram maiores índices de CTC se comparados aos outros tratamentos com BLE.

Para os índices de saturação por alumínio, pôde-se verificar que quanto maior a dose de BLE aplicada, independentemente do tipo de tratamento, maiores são os índices de saturação por alumínio ($p < 0,05$; Figura 5). Ressaltando que para o BLE onde o tempo e a temperatura de processamento foram maiores, o nível de saturação apresentou uma leve redução, mesmo com a dose mais alta, igualando aos outros tratamentos onde a dose de BLE foi reduzida.

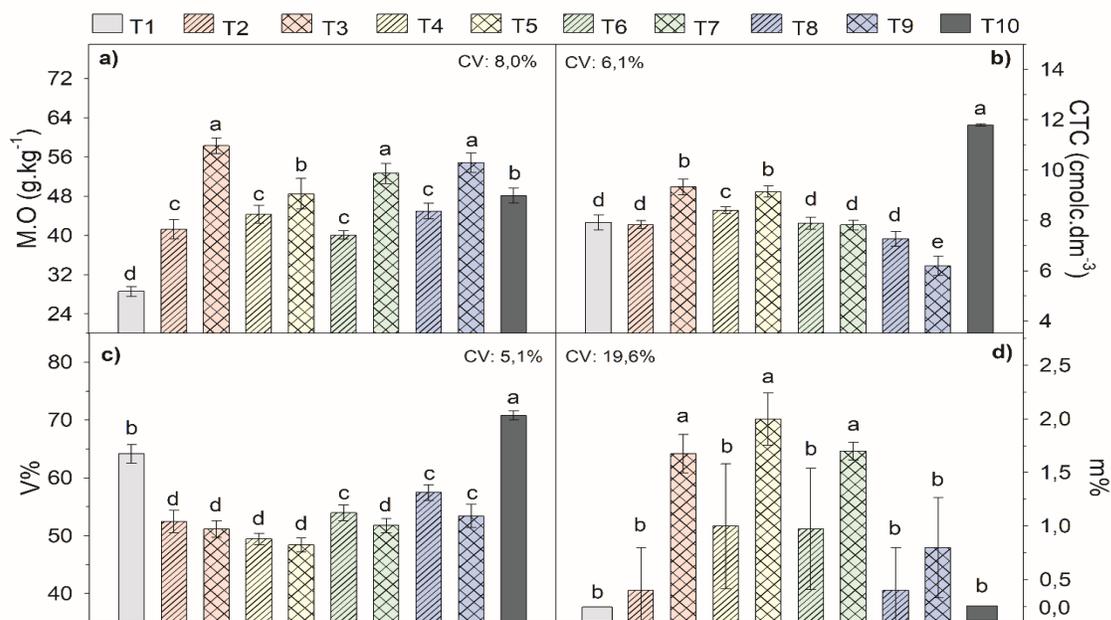


Figura 5. Matéria orgânica (a), capacidade de troca catiônica (b) saturação por bases (c) e saturação por alumínio (d) em solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Os dados do parâmetro m% foi transformado pela equação raiz (x+1) para realização do teste de média. Médias com letras diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. **T1:** Solo (tratamento controle); **T2:** BLE400°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BLE400°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BLE400°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BLE400°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BLE500°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BLE500°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BLE500°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BLE500°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK (tratamento padrão).

Os valores de pH em água e em cloreto de cálcio apresentaram redução significativa após a adição de BLE ao solo (Tabela 06), e de uma maneira geral, quanto maior a dose de BLE adicionada, maior a redução dos valores de pH do solo ($p < 0,05$; Figura 6), o que não é comum em estudos de análise de solo com adição de BLE, visto que de uma maneira geral, o *biochar* é utilizado para corrigir a acidez do solo (SHAABAN *et al.*, 2018). Dai *et al.* (2020) verificaram que dos 1110 artigos encontrados, somente 53 apresentaram resultados com pH baixo, o que representa 4,74% da quantidade total de *biochars* testados.

O lodo de esgoto utilizado neste estudo apresentou pH ácido (Tabela 01) e, mesmo após o processamento em altas temperaturas (400 °C e 500 °C), o *biochar* resultante não alcançou alcalinidade. Zielinska (2015) constatou que a alteração do pH da matéria prima inicial só ocorreu em temperaturas acima de 600 °C. Zang et Al. (2019) avaliou as propriedades químicas da aplicação de *biochar* em diferentes tipos de solo, e constatou que o latossolo vermelho, cuja característica é baixa alcalinidade, apresentou redução dos níveis de pH com a adição de *biochar* de lodo de esgoto.

O valor de referência do pH para o cultivo da rúcula está em torno de 6,0, e valores abaixo disso podem causar redução da disponibilidade de alguns nutrientes importantes para as plantas (Hede, et al., 2001). De modo geral, a grande maioria das hortaliças se desenvolve melhor com valores de pH do solo entre 6,0 e 6,5, mas isso é relativo principalmente em função do tipo de solo, teor de matéria orgânica e espécie considerada (Embrapa, 2007). Neste estudo, os valores de pH abaixo dos valores de referência, não foram prejudiciais para o desenvolvimento da cultura, conforme Figura 3.

A acidez potencial do solo se refere à quantidade de íons H^+ que um solo pode liberar quando todos os íons de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+) e potássio (K^+) são neutralizados (Brady e Wail, 2008). Neste sentido, verificou-se que a adição de BLE em doses maiores aumentou os teores de acidez do solo ($p < 0,05$; Figura 6), exceto para o BLE4, o qual houve um tempo de processamento de 2 horas e temperatura de $500^{\circ}C$.

Neste sentido, percebe-se que esta proporção está diretamente associada aos índices de pH do solo e Al trocável. Estes resultados corroboram com os encontrados por (Lorencetti, 2022), onde os valores de pH reduziram com a adição de LE ao solo, e aumentaram os níveis de Al, neste estudo, as doses testadas foram de 20, 40, 60 e 80 t/ha, e as análises foram realizadas na profundidade 5-10cm do solo, verificando-se que quanto maior a dose de BLE adicionada, maior a redução do pH e e maior o aumento na concentração de Al ao solo.

Com relação aos teores de alumínio trocável, pode-se verificar que a adição de BLE também provocou variações ($p < 0,05$; Figura 6). No entanto percebe-se que a maior influência está nos BLE processados a $400^{\circ}C$.

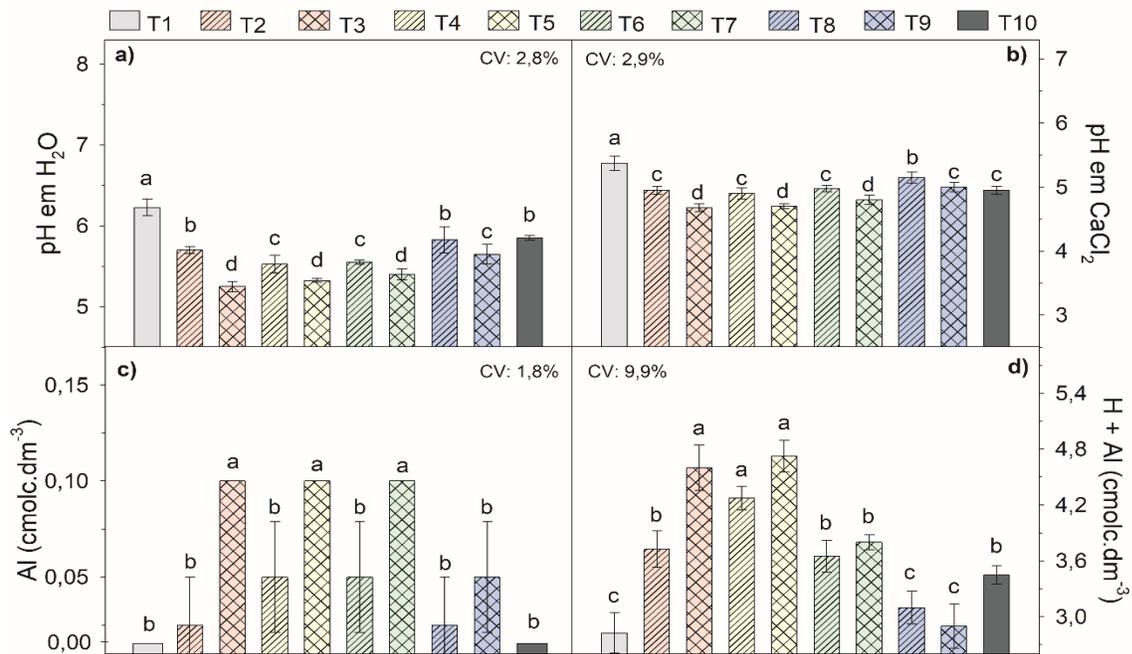


Figura 6. pH em água (a), pH em CaCl₂ (b) acidez potencial (c) e alumínio trocável (d) em solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. **T1:** Solo (tratamento controle); **T2:** BLE400°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BLE400°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BLE400°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BLE400°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BLE500°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BLE500°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BLE500°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BLE500°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK (tratamento padrão).

De uma maneira geral, a utilização de *biochar* de lodo de esgoto tem um impacto positivo nas propriedades químicas do solo e na disponibilidade de nutrientes. Os resultados sugerem que, embora o BLE possa aumentar a disponibilidade de fósforo e matéria orgânica, estudos são necessários para mitigar os efeitos negativos sobre a acidez do solo e a saturação por alumínio.

3.3 Teores de nutrientes nas folhas de rúcula

De uma maneira geral, os teores dos macronutrientes N, P e K, apresentaram aumento significativo com adição de todos os tratamentos (BLE + NPK), sendo N, o que teve maior

incremento com relação a adição de BLE, demonstrando valores mais elevados inclusive quando comparados ao tratamento padrão ($p < 0,05$; Figura 5). Na Figura 06, é possível observar que o único tratamento que apresentou valores de N abaixo do tratamento padrão, foi o T8 (B4 – 20Mg/ha+NPK), os demais tratamentos não apresentaram diferença com relação ao tratamento utilizando composto, e todos eles apresentaram níveis de N acima do tratamento controle(T1).

Com relação ao P, todos os tratamentos com adição de BLE e NPK, apresentaram aumento de disponibilidade deste nutriente em relação ao tratamento controle ($p < 0,05$; Figura 6). O estudo de Neves *et al.* (2015) ao adicionar BLE ao solo, apresentou incrementos dos valores de P disponíveis na planta em doses superiores a 20 Mg/ha. Segundo Coutinho *et al.* (1993), as quantidades de fósforo retiradas do solo pelas hortaliças são geralmente baixas, principalmente quando comparadas com as de nitrogênio e potássio, isso explica porque a quantidade deste nutriente foi bem superior no solo em comparação aos níveis verificados nas folhas.

Em relação ao parâmetro K, verificou-se que a adição dos tratamentos (BLE + NPK) apresentou maiores níveis de disponibilidade deste nutriente nas folhas de rúcula comparando ao tratamento controle (T1) ($p < 0,05$; Figura 7c). Este valor está associado a adubação mineral (NPK) que foi incluída nos tratamentos, visto que o BLE não apresentou valores de K disponíveis. Ainda assim, a disponibilidade de K na folha da rúcula ficou equiparada ao tratamento padrão (composto e adubação mineral), mesmo com níveis de K do solo com BLE apresentar valores abaixo do tratamento padrão ($p < 0,05$; Figura 7c).

A disponibilidade do Ca apresentou uma variação significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$; Figura 6). Pode-se verificar que os tratamentos no qual a dose de BLE foi maior, o

nível de Ca ficou inferior ao do tratamento controle. Exceto para o T9, que também utilizou a dose mais alta, mas com tempo e temperatura de processamento diferentes dos demais (BLE 500C° - 2horas).

Os níveis de Mg e S não apresentaram diferença significativa após adição dos tratamentos com BLE quando comparados ao tratamento controle (T1) ($p < 0,05$; Figura 7). Velli *et al.* (2021) ao adicionar diferentes tipos de tratamentos com BLE não apresentaram alterações dos teores de Mg e Ca. O estudo realizado por Neves *et al.* (2015) também não apresentou alterações nos níveis de S com a adição de BLE.

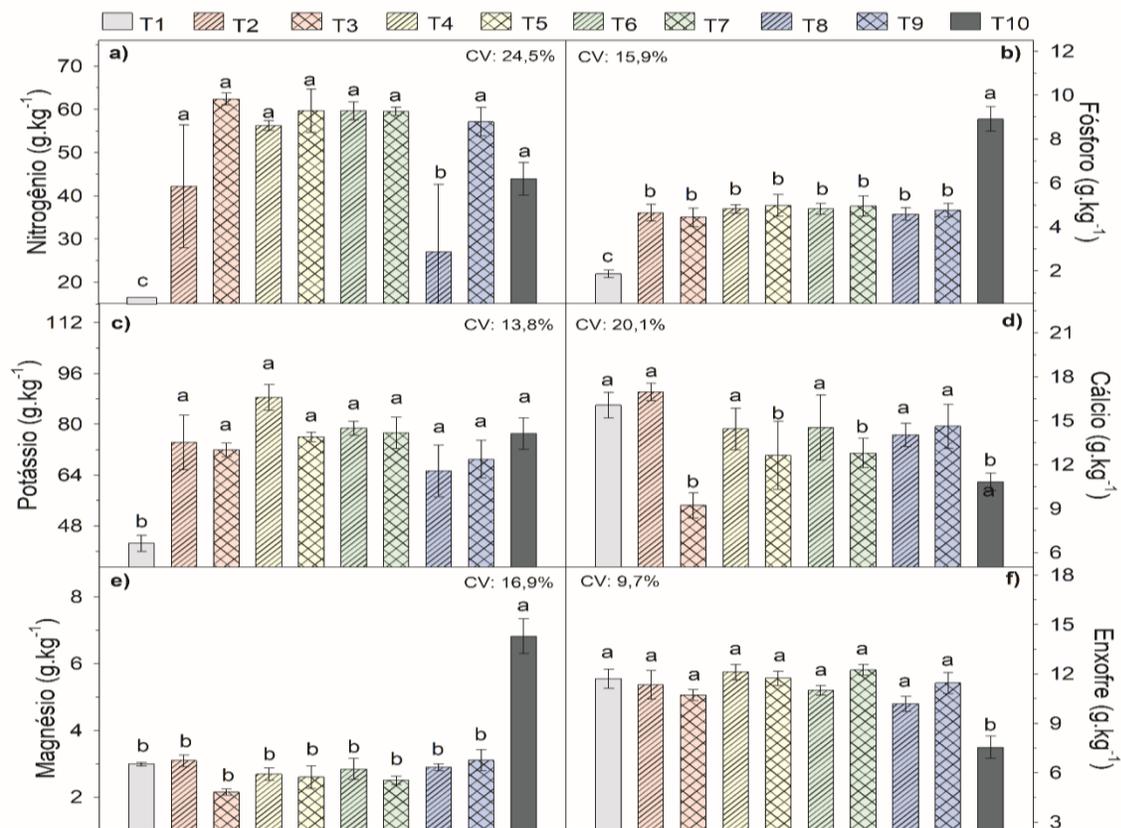


Figura 7. Concentração foliar de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) em Rúcula sob solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Os dados do parâmetro nitrogênio e ferro foram transformados pela equação raiz ($x+1$) para realização do teste de média. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média Scott-

Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. **T1:** Solo (tratamento controle); **T2:** BLE400°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BLE400°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BLE400°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BLE400°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BLE500°C - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BLE500°C - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BLE500°C - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BLE500°C - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK (tratamento padrão).

Com relação a disponibilidade dos micronutrientes, os únicos que não sofreram variação significativa com a adição de BLE quanto a disponibilidade, foram o B e o Fe ($p < 0,05$; Figura 8). Estes resultados corroboram os encontrados por Velli *et al.* (2021) onde a adição de BLE não alterou as concentrações de Fe disponíveis nas plantas. O Cu apresentou variação significativa nos tratamentos T3 a T7 ($p < 0,05$; Figura 8), com valores acima dos tratamentos controle e padrão (adubação mineral e composto).

Os valores de Zn apresentaram reduções significativas nos tratamentos T2, T6, T8 e T9 ($p < 0,05$; Figura 8), ficando com valores abaixo do tratamento controle e igualando ao tratamento padrão (adubação mineral e composto). No estudo de Velli *et al.* (2021) a concentração de Zn nas plantas também não foram afetadas. O Zinco é considerado um metal pesado (Alloway, 2012), e por isso a concentração desse elemento nas plantas deve ser controlada.

Com relação ao Mn, todos os tratamentos com adição de BLE, apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$; Figura 8) se comparados ao tratamento controle, os tratamentos que apresentaram maior incremento dos valores de Mn foram o T8 e T9, ambos produzidos a uma temperatura de 500°C. Estes tratamentos equipararam aos valores de Mn disponíveis no tratamento com adubação mineral e composto.

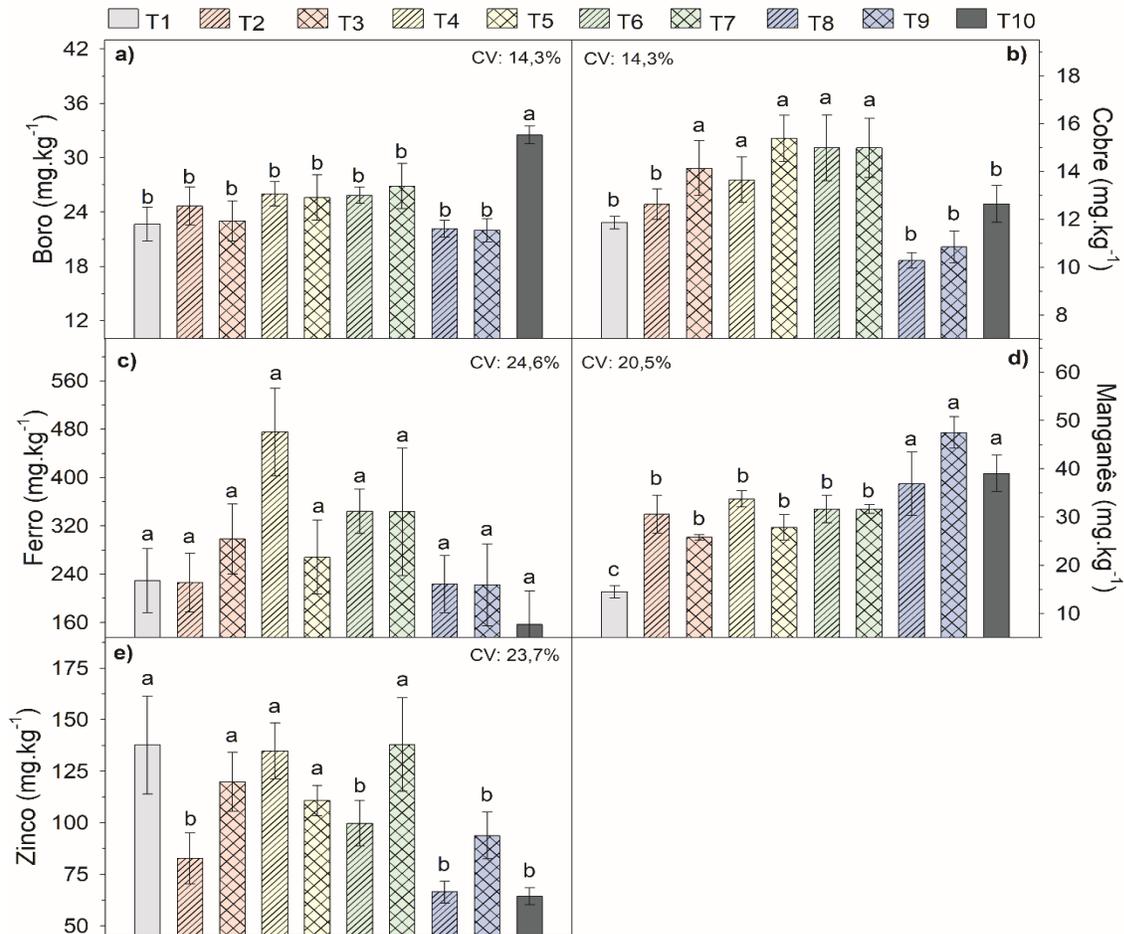


Figura 8. Concentração foliar de boro (a), cobre (b), ferro (c), manganês (d) e zinco (e) em Rúcula sob solo manejado com *biochar* obtido em diferentes tempos e temperaturas aplicado em duas doses. Letras minúsculas diferentes demonstram diferença estatística entre tratamentos, seguindo o teste de média *Scott-Knott* ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média amostral. **T1:** Solo (tratamento controle); **T2:** BC400° - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T3:** BC400° - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T4:** BC400° - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T5:** BC400° - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T6:** BC500° - 1Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T7:** BC500° - 1Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T8:** BC500° - 2Hora - 20 Mg/ha + NPK; **T9:** BC500° - 2Hora - 30 Mg/ha + NPK; **T10:** Composto Carolina Soil - 30 Mg/ha + NPK.

A utilização de BLE combinado com NPK mostrou-se eficiente em melhorar a disponibilidade de nitrogênio e fósforo na rúcula, essenciais para o desenvolvimento da mesma. Da mesma forma, a adição do BLE ao solo não apresentou aumento dos valores EPTs, de forma a tornar um fator prejudicial, embora seja válido ressaltar que os níveis de EPTs devem ser monitorados de forma constante.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstraram que a adição de BLE combinado com NPK ao solo, independente do tempo e da temperatura de pirólise, aumentou consideravelmente os níveis de P do solo e proporcionou melhora significativa dos valores de matéria orgânica. O tratamento que teve a maior disponibilidade de P, foi o tratamento com o maior tempo de processamento (2 horas) e a maior temperatura (500°C). Já com relação a M.O., a temperatura não teve influência, e sim a dose, pois quanto maior foi a dose aplicada, maiores foram os valores de matéria orgânica. Apesar disso, o BLE apresentou efeito residual e reduziu os valores de pH, o que por consequência também elevou os valores de Al disponível. A acidez não apresentou relação direta com o tempo e a temperatura de processamento, mas sim com dose utilizada. Com relação às respostas obtidas através das análises da folha da rúcula, os únicos parâmetros que sofrem alteração do tempo e temperatura de processamento do lodo de esgoto, foram manganês e zinco. Os tratamentos com maior tempo e temperatura de processamento mais elevadas foram os que apresentaram maiores níveis de manganês na folha, já para o zinco, os tratamentos onde a temperatura de processamento do BLE foi de 500°C, foram os que apresentaram redução dos níveis de zinco em comparação com o tratamento controle. E embora a adição do BLE ao solo tenha tornado o solo mais ácido, a rúcula se mostrou tolerante ao pH mais ácido e ao Al disponível proporcionado pelo *biochar*.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. Os Domínios de Natureza no Brasil-Potencialidades Paisagísticas. 1º ed. Cotia-SP: Ateliê Editorial, 2003.

ALLOWAY, B. J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer, 2012.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BOARETTO, A. E.; RAIJ, B. V.; SILVA, F. C.; CHITOLINA, J. C.; TEDESCO, M. J.; CARMO, C. A. F. S. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. In: Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. ver. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. The Nature and Properties of Soils. Pearson Prentice Hall, 14. ed. 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 3.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 ago. 2020. Seção 1, p. 109-110.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Seção 1, p. 81-84.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. v. 38, p. 68 – 94, 2012.

CHAGAS, J.K.M.; FIGUEIREDO, C.C.; PAZ-FERREIRO, J. Sewage sludge biochars effects on corn response and nutrition and on soil properties in a 5-yr field experimente. *Geoderma* 401, 2021.

CHHITI, Y.; KEMIHA, M., Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review. *The International Journal of Engineering and Science*, v. 2, n.3 p. 75-85, 2013.

COUTINHO, E. L. M.; NATALE, W.; SOUZA, E. C. A. Adubos e corretivos: aspectos particulares na olericultura. *Nutrição e adubação de hortaliças*. Jaboticabal: FCAV. p. 85-140, 1993.

DAI, Y. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, v. 713, p. 136635, 2020.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solos*. 2 ed. Rio de Janeiro. p. 212, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa Hortaliças. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: produção orgânica de hortaliças. O produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007.

FACHINI, J. et al. One Year Residual Effect of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment for Maize in a Brazilian Oxisol. *Sustainability*, v. 13, n. 4. 2021.

FARIAS, W. M.; FIGUEIREDO, C. C.; VALE, A. T.; COSER, T. R.; SCHNEIDER, B. G. Biochar de lodo de esgoto como condicionador do solo: efeitos nas propriedades agronômicas, fertilidade do solo e qualidade da matéria orgânica. *Repositório Institucional – UNB*, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2017.1360488>. Acesso em: 20 mar. 2024.

FIGUEIRA, F. A. R. Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 402. 2000.

FISCHER, D.; GLASER, B. Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. *Management of Organic Waste*. 2012. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/management-of-organic-waste/synergism-between-biochar-and-compost-for-sustainable-soil-amelioration>. Acesso em: 20 mar. 2024.

GLASER, B.; LEHR, V. I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis. *Sci Rep*, v. 9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>. Acesso em: 10 jun. 2024.

GONDEK, C. Sewage Sludge Biochar Effects on Phosphorus Mobility in Soil and Accumulation in Plant. *ECOL CHEM ENG S*, v. 26, n. 2, 2019.

Haidar, R. F.; Fagg, J. M. F.; Pinto, J. R. R.; Dias, R. R.; Damasco, G.; Silva, L. de C. R.; Fagg, C. W. Florestas estacionais e áreas de ecótono no estado do Tocantins, Brasil: parâmetros estruturais, classificação das fitofisionomias florestais e subsídios para conservação. *Acta Amazônica*, v. 43, n. 3, p. 261-290, 2013.

HEDE, A. R.; SKOVMAND, B.; LOPEZ-CESATI, J. Acid soils and aluminum toxicity. *Application of Physiology in Wheat Breeding*. CIMMYT, 2001.

HUANG, R. Transfer of Wastewater Associated Pharmaceuticals and Personal Care Products to Crop Plants from Biosolids Treated Soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 85, 2012.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. 2012. Disponível em: http://www.biochar-international.org/sites/default/files/Guidelines_for_Biochar_That_Is_Used_in_Soil_Final.pdf. Acesso em: 12 nov. 2013.

JiEn, S.H.; Wang, C.S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*. 2013.

JOSEPH, S. The properties of fresh & aged biochar. *The Properties of Fresh and Aged Biochar. Biochar for Sustainable Soils*, 2018. Disponível em: <https://biochar.international/guides/properties-fresh-aged-biochar>. Acesso em: 20 mai. 2024.

LEHMANN, J.; KUZYAKOV, Y.; PAN, G.; OK, Y. S. Biochars and the plant-soil interface. *Plant and Soil*, v. 395, p. 1-5, 2015.

LORENCETTI, G. A. T. Lodo de ETE agroindustrial: uso agrícola e produção de biochar.. Trabalho de pesquisa de doutorado (Doutorado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Produção Vegetal, 2022.

LUO, X.; LIU, G.; XIA, Y.; CHEN, L. *Biochar for a Sustainable Environment*. Qingdao Agricultural University, Shenzhen University, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342145807_BIOCHAR_FOR_A_SUSTAINABLE_ENVIRONMENT. Acesso em: 12 abr. 2024.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S. *Metodologia para Análise de Elementos em Material Vegetal. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações -2.ed.* Piracicaba : POTAFOS, 1997

MANUAL DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA OS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA. Disponível em: <https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/manual_de_adubacao_2004_versao_internet.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MERCL, F.; KOSNAR, Z.; MARSIK, P.; VOJTISEK, M.; DUSEK, J.; SZAKOVA, J.; TLUSTOS, P. Pyrolysis of Biosolids as an Effective Tool to Reduce the Uptake of Pharmaceuticals by Plants. *J. Hazard. Mater*, 2021.

MIERZWA-HERSZTEK, M., GONDEK, K., KLIMKOWICZ-PAWLAS, A., BARAN, A. Effect of wheat and Miscanthus straw biochars on soil enzymatic activity, ecotoxicity, and plant yield. *International Agrophysics*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0063>. Acesso em: 12 mai. 2024

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos*. Brasília, DF: MAPA, 2017.

Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

MONTEIRO, A. B. et al. Substrates for seedlings with sewage sludge and biochar. *Rev. Ceres*, v. 67, n. 6. 2020.

NEVES, H. C. V.; SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Biochar de lodo de esgoto: efeitos na fertilidade do solo no cultivo de rabanete. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. O solo e suas múltiplas funções. Viçosa: SBCS, 2015.

NOVAK, J.M.; BUSSCHER, W.J.; LAIRD, D.S.; AHMEDNA, M.; WATTS D.W.; NIANDOU, M. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil. *Soil Science*, 2009.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M. M.; CORTEZ, L. A. B. Aplicação dos Produtos da Pirólise Rápida de Biomassa como Fertilizante Natural. *Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Cap. 13, 2009.

SHAABAN, M. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of Environmental Management*, v. 228, 2018.

SILVA, M.I.S.; MACKOWIAK, C.; MINOGUE, P.; REIS, A.F.; MOLINE, E.F.V. Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.47: 01, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/s7jLZj5f5PtyJQRq4R8FJCw/?format=pdf&lang=en>, acesso em: 7 jun. 2022.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking do Saneamento 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2024>. Acesso em: 4 dez. 2024.

VELLI, P.; MANOLIKAKI, I.; DIAMADOPOULOS, E. Effect of biochar produced from sewage sludge on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth, soil chemical properties and heavy metal concentrations. *Journal of Environmental Management*, v. 297, 2021.

VIEIRA, G. E. G. Fontes alternativas de energia – Processo aperfeiçoado de conversão térmica. Tese (Doutorado). Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 2004.

VILAR, P. Produção de rúcula. AgricOnline, 2023. Disponível em: <https://agriconline.com.br/portal/artigo/rucula/>. Acesso em: 27 mai. 2024

WU, C.; SPONGBERG, A. L.; WITTER, J. D.; SRIDHAR, B. B. M. Transfer of Wastewater Associated Pharmaceuticals and Personal Care Products to Crop Plants from Biosolids Treated Soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 85, 2012.

ZIELINSKA, A. et al. Effect of Sewage Sludge Properties on the Biochar Characteristic. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jaap.2015.01.025>. Acesso em: 13 jun. 2024.