UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
CURSO DE AGRONOMIA

EFEITO RESIDUAL DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NOS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DO MILHO

LOURIVAL ALVES NETO

BRASÍLIA, DF
2024

LOURIVAL ALVES NETO

EFEITO RESIDUAL DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NOS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DO MILHO

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo.

Brasília, DF

2024

LOURIVAL ALVES NETO

EFEITO RESIDUAL DO BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO NOS INDICADORES DE FERTILIDADE DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DO MILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em ____ de _____ de _____

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília
Orientador

_____

Dra. Camila Rodrigues Costa
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília
Examinadora

_____

Dr. José Ferreira Lustosa Filho
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília
Examinador

Dedico este trabalho a Deus, e às pessoas mais importantes na minha vida: meus pais, Milva e Lourival e minha irmã, Ana Carolina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me capacitar e abençoar minha vida e de meus familiares.

À minha mãe Milva Pinheiro Capanema, ao meu pai Lourival Barbosa de Faria Alves, cujo trabalho, apoio, exemplo, dedicação e paciência de ambos foram essenciais em minha jornada. À minha irmã, Ana Carolina Capanema Alves que sempre esteve ao meu lado, seja dando apoio ou conselhos e à minha avó, Ivete Barbosa de Faria Alves por sempre estar ao meu lado quando precisei. Muito obrigado por serem uma família tão unida e que posso contar nos momentos de felicidade ou tristeza. Amo vocês!

Agradeço à Universidade de Brasília, que foi uma segunda casa nos últimos anos. À toda equipe de professores e funcionários que contribuíram de forma inigualável na minha graduação. Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo, que me conduziu na execução deste trabalho, pela confiança em me aceitar na equipe, envolvimento, orientações e principalmente pelos conselhos que me deu, guardarei cada um deles pelo resto da vida. Ao Prof. Dr. Sérgio Lucio que sempre me ajudou, aconselhou e abriu muitas portas dentro da Universidade para mim e principalmente por sua amizade. Ao Prof. Dr. Rodrigo Vidal que me convidou a ser integrante do NEPPRAC, por sua amizade e pelos trabalhos que fizemos juntos.

Muito obrigado a todo o pessoal do Laboratório de Estudos da Matéria Orgânica do Solo, em especial à Camila Costa que dividiu muitos momentos de trabalho comigo, Jane, Rhaila, Celina, Wanduir e José.

Muitíssimo obrigado a todos

RESUMO

O lodo de esgoto (LE) é um resíduo sólido gerado no processo de tratamento de águas residuais nas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Seu uso na agricultura é limitado devido à presença contaminantes, como metais pesados e organismos patogênicos ao ser humano, porém, pode ser viabilizado após conversões termoquímicas, por meio de pirólise, transformando-o em biochar de lodo de esgoto (BCLE), que é um material livre de patógenos e seguro para a aplicação em solos agrícolas. O LE tem altas concentrações de P, N, Ca e Zn, e baixa concentração de K. No caso do P, a maior parte está na forma inorgânica, com predomínio de fosfato de alumínio, sendo resiliente às perdas por volatilização. Durante o processo de pirólise há mudanças na concentração e na disponibilidade de nutrientes. Quando aplicados ao solo, parte dos nutrientes é disponibilizado em curto prazo e outra parte pode permanecer no solo por longos períodos. Por isso, torna-se fundamental o entendimento da dinâmica de liberação de nutrientes do BCLE ao longo do tempo no campo. O objetivo desse trabalho foi analisar o efeito residual dos indicadores de fertilidade do solo oito safras após a interrupção da aplicação de BCLE, obtidos em diferentes temperaturas de pirólise, em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico. Para tal, em um experimento de campo foram aplicados, nas duas primeiras safras, 15 t ha^{-1} de BCLE produzidos a 300°C (BCLE300) e 500° (BCLE500) para cultivo de milho. Na safra 2023/2024, foram avaliados os indicadores de fertilidade do solo e a produtividade de grãos de milho. Os resultados do trabalho demonstram que o BCLE pode ser uma boa fonte de liberação gradual de P para o solo. Maiores teores de fósforo no solo foram encontrados nas parcelas tratadas com as combinações de NPK+BCLE (300 e 500°C). Menores valores de K foram observados nas parcelas tratadas exclusivamente com os BCLEs (300 e 500 °C), demonstrando a deficiência desse nutriente em sua composição, sendo necessária a complementação deste nutriente por meio de outra fonte. Mesmo sob efeito residual de sete safras, o BCLE300 manteve níveis de produtividade de grãos de milho similares à adubação convencional anual com NPK. Menores valores de soma de bases, saturação por bases, pH, Ca^{2+} e Mg^{2+} foram observados na parcela tratada com a combinação NPK+BCLE500.

Palavras-chave: Biocarvão, pirólise, fósforo, biossólido, Fósforo (P).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 27

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: 29

2.1. Fósforo (P) na agricultura ..... **Erro! Indicador não definido.**

2.2. Lodo de esgoto 29

2.3. Biochar de lodo de esgoto: produção e importância agrícola 30

2.4. Biochar de lodo de esgoto como fonte de P 31

3. MATERIAL E MÉTODOS 33

3.1. Localização e histórico da área experimental 33

3.2. Produção e caracterização do bichar de lodo de esgoto 36

3.3. Delineamento experimental 37

3.4. Condução da décima safra 38

3.5. Coleta e análise de solo 40

3.6. Avaliação da produtividade do milho 40

3.7. Análise Estatística 41

4. Resultados e discussões 42

4.1. Análise de solo ..... **Erro! Indicador não definido.**

4.2. Avaliação de produtividade do milho 46

5. CONCLUSÕES 48

6. REFERÊNCIAS 49

1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento da população mundial, a demanda global por alimentos tem aumentado significativamente, o que coloca a agricultura diante de desafios relacionados à disponibilidade de recursos essenciais, como os fertilizantes, especialmente os fosfatados. Projeções indicam que a escassez de fertilizantes fosfatados pode intensificar nas próximas décadas, devido à exaustão das reservas minerais de fosfato, o aumento dos custos de produção e à competição por matérias-primas entre diferentes setores industriais (HUANG et al., 2021). Diante desse cenário desafiador, torna-se necessária a busca de alternativas, que possibilitam desenvolvimento sustentável agrícola.

Outro grande desafio enfrentado pela humanidade é a gestão do lodo de esgoto (LE). Diariamente são produzidas cerca de 420 toneladas de LE somente no Distrito Federal (CAESB, 2024). O LE é um resíduo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Apresenta composição variada, dependendo da origem das águas residuais e do processo de tratamento utilizado (ZOU et al., 2021). O LE é rico em matéria orgânica e nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, com destaque para o P (HUANG et al., 2019). No entanto, devido à presença de patógenos, contaminantes orgânicos e inorgânicos e metais pesados, a utilização do LE é restrita, sendo sua aplicação condicionada a legislação específica (SMITH et al., 2019). Portanto, é necessário buscar alternativas para viabilizar o uso desse resíduo (AGUILERA et al., 2017).

Atualmente, são utilizados, como forma de tratamento do LE, digestão anaeróbica, desidratação, compostagem e estabilização química (CHEN et al., 2022). Entre elas, a transformação térmica do LE, por meio da pirólise, em biochar de LE (BCLE) vem ganhando força (ZHANG et al., 2023a).

O BCLE é um insumo livre de patógenos, e quando aplicado ao solo tem a capacidade de melhorar a fertilidade, aumentar retenção de água e sequestro de carbono (YANG et al., 2020). Dentre os muitos nutrientes presentes no BCLE, o P merece destaque (ZHANG et al., 2021a). No BCLE o P é encontrado sob diversas formas, grande parte desse P está ligado ao Ca (YAO et al., 2019), fração essa associada a minerais de baixa solubilidade (CHAGAS, 2021). Devido às diversas formas de P presentes nos biochars de lodo de esgoto (BCLEs) este produto emerge como uma excelente alternativa de liberação lenta de P para

suprir a iminente escassez desse nutriente para agricultura. No entanto a eficácia do BCLE como fertilizante fosfatado vai depender das condições de pirólise e das características iniciais do LE (FANG et al., 2021).

Embora tenha ocorrido um aumento significativo do número de estudos utilizando o BCLE, aproximadamente dois terços deles são realizados em vasos experimentais (SUN et al., 2021). Além disso, os estudos que empregam o BCLE em condições de campo geralmente demonstram resultados de um a dois anos ou safras (JIANG et al., 2023). Desse modo, as informações sobre os efeitos de longo prazo do BCLE ainda são limitadas.

Dessa forma, é essencial a condução de pesquisas de longo prazo sobre os efeitos da aplicação do BCLE no solo. A fim de determinar se os recursos investidos na produção e aplicação desse produto podem ser recuperados por meio do aumento da produtividade e dos ganhos ambientais (JIANG et al., 2023).

Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito residual do BCLE, após oito safras da suspensão da aplicação. Foram avaliados os efeitos de dois BCLE obtidos em diferentes temperaturas de pirólise (300 °C e 500°C), sobre a produtividade de grãos de milho e sobre os indicadores de fertilidade do solo, em especial na disponibilidade de P.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

2.1. Lodo de esgoto

Antes de ser devolvido ao meio ambiente, o esgoto passa por tratamento essencial para mitigar seus impactos ambientais (WANG et al., 2020). Durante o processo de tratamento de esgoto um subproduto é gerado, conhecido como lodo de esgoto (LE). Este é composto por microrganismos vivos e mortos, bem como por materiais orgânicos e minerais sedimentados e acumulados ao longo das diversas fases do tratamento de águas residuais (KIM et al., 2020).

No tratamento de esgoto, o potássio (K) é frequentemente perdido devido à sua natureza como sal altamente solúvel. Durante o processo de tratamento, o K é facilmente lixiviado e removido com os efluentes líquidos, resultando em concentrações significativamente reduzidas no LE (WANG et al., 2019).

Atualmente, por volta de 420 toneladas de LE são produzidas por dia nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do DF, somando aproximadamente 153 mil toneladas por ano (CAESB, 2020). O LE é um material rico em matéria orgânica e nutrientes para a planta, mas seu uso na agricultura é limitado devido à possível presença de contaminantes como metais pesados ou organismos patogênicos ao ser humano e ao meio ambiente (FIJALKOWSKI et al., 2017). Portanto, a utilização de LE na agricultura é dependente da proporção de contaminantes em sua composição, sendo regulado por legislação específica e, que varia entre países (CAMPOS et al., 2021). No Brasil a resolução CONAMA n° 498, publicada em outubro de 2020, determina os critérios e procedimentos para uso do LE para fins agrícolas, fixando limites máximos de substâncias inorgânicas e de agentes patogênicos que delimitam os requisitos mínimos de qualidade do LE.

Como resultado disso, grandes quantidades de LE se acumulam nos pátios de secagem das ETEs. Atualmente existem diversas alternativas para aumentar a segurança e viabilizar o uso do LE na agricultura, como digestão anaeróbica seguida de compostagem, secagem térmica e granulação (WANG et al., 2023) e o tratamento térmico por pirólise (FIGUEIREDO et al., 2018).

2.2. Biochar de lodo de esgoto: produção e importância agrícola

A pirólise é um processo termoquímico que envolve a decomposição de materiais orgânicos em altas temperaturas na ausência de oxigênio (ZHAO et al., 2021a). Esse processo é amplamente utilizado para converter resíduos orgânicos, incluindo o LE, em produtos valiosos que podem ser utilizados para melhoria do solo (CHEN et al., 2020). A ausência de oxigênio impede a combustão, permitindo a preservação de uma grande quantidade de carbono na forma de biochar, que é um material com propriedades benéficas para o meio ambiente e a agricultura (LEHMANN et al., 2021). Além disso, há a produção de um líquido orgânico condensável chamado bioóleo ou alcatrão, e um gás combustível não condensável, composto por hidrogênio, óxidos de carbono, hidrocarbonetos leves e outros compostos, dependendo das condições da reação (CHEN et al., 2022)

As características do biochar são determinadas principalmente pela biomassa utilizada e as condições da pirólise, principalmente a temperatura máxima, a taxa de aquecimento e o tempo de residência (ZHANG et al., 2021b). Diversas biomassas podem ser utilizadas para a produção de biochar, por exemplo, materiais lenhosos, resíduos agroindustriais, florestais (ZHANG et al., 2021b) e resíduos urbanos como o LE (FIGUEIREDO et al., 2018).

O BCLE é um composto livre de patógenos e seguro para a aplicação em solos agrícolas (FIGUEIREDO et al., 2018). Quando comparado ao LE *in natura,* o BCLE apresenta diversas vantagens, como o aumento da área superficial específica, do volume dos poros, do pH e do teor de cinzas (CUI et al., 2019). Como também, ocorre a redução do volume e consequente redução do valor de transporte (HUANG et al., 2019).

Além disso, o BCLE pode acarretar importantes benefícios para a fertilidade do solo, como aumento do pH, dos teores de macro e micronutrientes, principalmente C, N, P, Ca e Mg, capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), soma das bases (SB) (HUANG et al., 2019) e melhoria na retenção de água e da porosidade (FARIA et al., 2018).

A utilização de BCLE na agricultura apresenta um potencial significativo para melhorar as condições do solo e promover a sustentabilidade ambiental (SOHI et al., 2020). O BCLE contribui para a retenção de carbono no solo,

ajudando a mitigar as mudanças climáticas ao sequestrar carbono de forma estável, o que também beneficia a estrutura e a fertilidade do solo (WOOLF et al., 2021). No entanto, apesar do aumento da quantidade de estudos sobre o biochar, a maioria das pesquisas tem sido conduzida em condições controladas, como vasos experimentais, o que limita a compreensão de seu comportamento em ambientes reais (LEHMANN et al., 2021). Portanto, é essencial avaliar o impacto do BCLE nos indicadores de fertilidade do solo e seu comportamento ao longo do tempo.

Além disso, a aplicação de BCLE pode representar uma solução sustentável para a gestão do lodo de esgoto, transformando um resíduo potencialmente poluente em um recurso valioso para a agricultura (YAO et al., 2019). No entanto, os estudos de campo são fundamentais para validar os possíveis benefícios do BCLE e validar sua adoção como uma prática agrícola sustentável e eficiente.

2.3. Biochar de lodo de esgoto como fonte de nutrientes, especialmente de P.

A avaliação dos teores de nutrientes no solo é fundamental para entender a disponibilidade de elementos essenciais para o desenvolvimento das culturas, especialmente no caso do milho, que possui altas exigências nutricionais (SANTOS et al., 2020). O balanço adequado de macronutrientes, como P, nitrogênio e potássio, garante não apenas o crescimento saudável da planta, mas também impacta diretamente a produtividade final (KANG et al., 2020). Assim como a deficiência desses nutrientes no solo acarreta queda na produtividade, os teores encontrados na análise de solo permitem uma previsão comparativa da produtividade (z et al., 2022b).

O BCLE tem se destacado como uma alternativa promissora para a fertilização do solo, devido à sua capacidade de melhorar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (KUMAR et al., 2022a). Como também é rico em nutrientes, como P, S, Ca e Mg, que são fundamentais para o desenvolvimento vegetal (AHMAD BATH et al., 2022). A aplicação deste material orgânico no solo não apenas enriquece sua fertilidade, mas também contribui para a melhoria das

propriedades físico-química, promovendo uma estrutura mais estável e uma maior retenção de umidade (MIYAMOTO et al., 2023).

Entretanto, o BCLE apresenta deficiência de potássio (K), em virtude das perdas ocorridas durante o processo de tratamento de esgoto (WANG et al., 2019), além de perdas de nitrogênio (N), que se deve à volatilização durante a pirólise, esse processo é maior, quanto mais elevada for a temperatura (KIZITO et al., 2019). Essa carência de K pode impactar a eficiência do BCLE como fertilizante, exigindo que práticas complementares de adubação sejam adotadas para garantir uma nutrição equilibrada das plantas e otimizar os resultados em sistemas agrícolas.

A aplicação de BCLE no solo tem efeitos significativos sobre diversos indicadores de fertilidade, com destaque para a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e o pH (SILVA et al., 2022). O BCLE, por sua natureza alcalina, pode neutralizar a acidez do solo, promovendo um pH que favorece a disponibilidade de nutrientes (GARCIA et al., 2021). Além disso, sua aplicação aumenta a CTC do solo, permitindo uma maior retenção de cátions como cálcio e magnésio (LIMA et al., 2022). Essa combinação resulta em um ambiente mais favorável à nutrição vegetal, contribuindo para melhores índices de crescimento e produtividade.

Outro aspecto importante da utilização de BCLE é seu impacto na matéria orgânica do solo. O BCLE é rico em carbono, que se incorpora à matriz do solo, aumentando a matéria orgânica total e, consequentemente, melhorando a estrutura do solo (CEBALLOS et al., 2021). A elevação do teor de matéria orgânica é crucial para a melhoria da retenção de água e a promoção da atividade microbiológica, que são essenciais para a ciclagem de nutrientes (XIA et al., 2020).

Além disso, o uso de BCLE aumenta os níveis de P no solo (FIGUEIREDO et al., 2018), devido ao alto teor desse elemento no LE (TORRI et al., 2017). A maior parte do P contido no LE está na forma inorgânica, com predomínio de fosfato de alumínio (TORRI et al., 2017). Este é resiliente às perdas por volatilização quando submetidos a temperaturas abaixo de 700°C (CHEN et al., 2017).

As concentrações totais de P, presentes no BCLE são dependentes das condições de pirólise. Em estudo que comparou os BCLEs produzidos a 300°C e 500°C, foi observado que os teores de P foram de 4,11% e 6,13%, respectivamente. Isso representa um aumento relativo de 1,2% e 1,7% respectivamente, em comparação com o LE (FIGUEIREDO et al., 2018). Esse aumento de concentração se dá devido às perdas durante o processamento térmico, principalmente de água e gases de alguns elementos como C, H, O e N (ZHANG et al., 2021a).

A adição de BCLE no solo pode modificar os teores e a disponibilidade de nutrientes. No caso do P isso ocorre por causa da modificação das frações do P inorgânico, pois a adição do BCLE pode adsorver cátions como Al^{3+}, Fe^{3+} e Ca^{2+}, diminuindo a adsorção ou precipitação do P no solo (ZHANG et al., 2023b). Deste modo, aumentos nos teores de P foram observados com aplicação de quantidades maiores de BCLE (SOUSA et al., 2016). A pirólise aumenta as concentrações totais de P no BCLE, mas o P disponível é altamente vinculado às condições da pirólise. Diferente dos fertilizantes fosfatados que adicionam P 100% disponível para a absorção radicular, apenas uma fração do P adicionado pelo BCLE está prontamente disponível para as plantas (ZHANG et al., 2021a). Por exemplo, há redução do P disponível às plantas no BCLE com o aumento da temperatura de pirólise, passando de 25,6% no LE para 16,2, 1,7 e 1% nos BCLE pirolisados a 400, 500 e 600°C, respectivamente (ADHIKARI et al., 2019).

A diminuição na disponibilidade do P para as plantas está associada à formação de diferentes formas de P no BCLE devido ao aumento da temperatura de pirólise. Embora o teor de P disponível no solo aumente após a aplicação do BCLE, essa quantidade representa apenas uma pequena fração do total de P adicionado (YAO et al., 2019). Portanto, o BCLE pode atuar como uma fonte de liberação lenta de P no solo, mas a duração desse efeito ainda não foi plenamente estabelecida (CHAGAS, 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e histórico da área experimental

O experimento foi realizado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB), nas coordenadas geográficas 15°56`44.99” S e

47°55`43.39" O, a 1093 m de altitude. O clima da região é classificado como tropical estacional de savana Aw (BECK et al., 2018). Estação chuvosa ocorre entre outubro e março, com precipitação anual média de 1450 mm, segundo a estação meteorológica localizada na FAL. No entanto, o ano de 2023 registrou precipitação de 1200 mm e temperatura variando entre 13,8 e 28 °C (AgroClima, 2023). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura argilosa (SANTOS et al., 2018).

Até o ano de 2005, a área experimental estava coberta por vegetação nativa do Cerrado (Figura 1). A partir de então, a área foi desmatada e convertida em pastagem, permanecendo assim até a instalação do experimento em 2014 (Figura 1).

Antes da implementação do estudo a área não recebia nenhum tipo de insumo, resultando em um forte estado de degradação. Portanto, antes do plantio da primeira safra, foi necessário aplicar calcário, na dose de 1240 kg ha^{-1}, para correção da acidez do solo e elevar a saturação por base (V) para 55% (Tabela 1). Sempre que necessário foi feita a correção da acidez a fim de manter a saturação por base em torno de 55%. Adicionalmente, devido aos níveis baixos de P e K disponíveis no solo (Tabela 1), foi feita a adubação corretiva em toda extensão da área durante as duas primeiras safras, nas doses de 1110 kg ha^{-1} de superfosfato simples e 85 kg ha^{-1} de cloreto de potássio. A partir da terceira safra, a adubação corretiva foi realizada de acordo com a demanda de cada parcela. Essa é uma prática comum para viabilizar o cultivo de grãos no solo brasileiro (SANCHEZ, 2019). Tais procedimentos foram indispensáveis para garantir uma produção mínima de grãos nas parcelas não adubadas durante a safra, viabilizando, desse modo, a comparação com os demais tratamentos.

Antes do plantio, nas duas primeiras safras, foram aplicados 15 t ha^{-1} de BCLE (peso seco) por safra (Figura 1). O BCLE foi incorporado na camada de 0-20 cm, em área total, utilizando-se enxada rotativa. A aplicação de BCLE foi suspensa a partir da terceira safra (2017-2024) com o propósito de avaliar seu efeito residual. A quantidade de BCLE foi determinada com base em um estudo anterior que demonstrou que maiores produtividades foram alcançadas com a aplicação de 10-20 t ha^{-1} de BCLE (SOUSA et al., 2016).

Em todas as safras a adubação mineral de plantio foi aplicada na linha de semeadura. As parcelas que receberam adubação mineral (NPK, BC300+NPK,

BC500+NPK) foram adubadas ao longo das dez safras com formulado 4-14-8, na dose de 714 kg $ha^{-1,}$ que correspondeu à 30 kg ha^{-1} de N (como ureia), 45 kg ha^{-1} de P (como superfosfato simples e triplo) e 48 kg ha^{-1} de K (na forma de cloreto de potássio). Além disso, foram realizadas adubações de cobertura em V4 (quatro folhas desenvolvidas) e V8 (8 folhas desenvolvidas). A quantidade de adubação de manutenção foi aplicada seguindo a recomendação para a cultura do milho a fim de atingir a produtividade de 10 t $há^{-1}$ de grãos, seguindo as recomendações de Sousa e Lobato (2004).

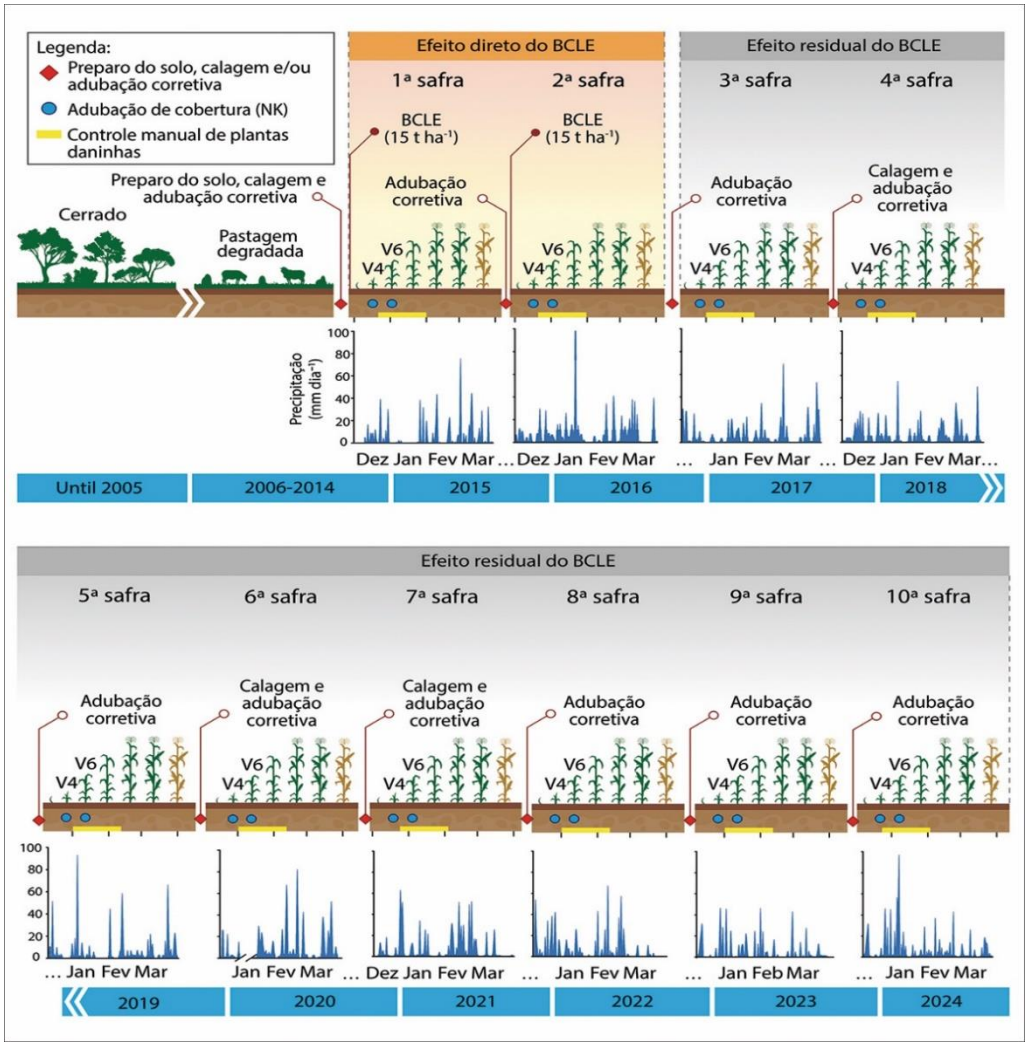


Figura 1. Histórico da área experimental. Fonte: Adaptado de CHAGAS 2021.

Tabela 1. Propriedades químicas do solo antes da instalação do experimento.

pH	CO	P	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SB
$CaCl_2$	g kg^{-1}	mg kg^{-1}		$cmol_c$ kg^{-1}		
4,90	19,80	2,30	61,00	2,40	0,90	3,40

Al^{3+}	H+Al	CTC	V	Areia	Silte	Argila
	$cmol_c$ kg^{-1}		%		g kg^{-1}	
0,04	5,90	9,30	36,60	45,00	360,00	595,00

CO: carbono orgânico; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V:saturação por bases. Adaptado de Faria et al. (2018).

3.2. Produção e caracterização do biochar de lodo de esgoto

Para a produção dos BCLEs, foram coletadas amostras uniformes de LE nas estações de tratamento de esgoto (ETE) Gama e Samambaia (Brasília, Distrito Federal). As duas ETEs tratam esgoto principalmente doméstico e utilizam um sistema de tratamento de nível terciário, no qual o LE é centrifugado, a fim de remover os efluentes líquidos, disposto em leitos de secagem solar até atingir 20% de umidade e, em seguida, é armazenado. Após esse procedimento, as amostras foram levadas para o laboratório e passadas em peneira de malha de 8 mm, logo após, foram utilizadas para a produção de biochars de 300°C (BC300) e 500°C (BC500) em forno mufla (modelo KK-220 Linn Elektro Therm, Eschenfelden, Alemanha). O LE foi disposto em um recipiente de metal adaptado a mufla com uma taxa média de aumento da temperatura de 2,5 °C min^{-1}, e permanecendo durante 30 minutos nas temperaturas de 300°C e 500°C. Ao fim da pirólise os BCLEs foram pesados e armazenados em sacos de plástico até serem aplicados no solo. A caracterização química, física e microbiológica do LE e dos BCLEs estão descritos na tabela 2**.**

Tabela 2. Caracterização do lodo de esgoto (LE) e dos biochars pirolisados a 300 (BC300) e 500°C (BC500).

Característica	Unidade	LE	BC300	BC500
pH ($CaCl_2$)	-	4,8±0,4	5,8±0,2	6,5±0,3
C	%	21,0±0,4	23,4±0,4	19,0±0,2
H	%	4,2±0,1	3,6±0,1	1,7±0,1
N	%	3,0±0,1	3,3±0,1	2,3±0,1
C/N	-	7,0±0,1	7,0±0,1	8,3±0,1
$N\text{-}NO_3^-$	mg kg^{-1}	23,3±3,4	17,5±2,8	5,8±0,9
$N\text{-}NH_4^+$	mg kg^{-1}	461±36	432±31	169±20
P	g kg^{-1}	35,7±2,8	41,1±3,2	61,3±5,6
K	g kg^{-1}	0,8±0,1	1,6±0,1	1,3±0,1
Ca	g kg^{-1}	6,6±0,2	6,7±0,2	8,2±0,3
Mg	g kg^{-1}	0,8±0,1	1,8±0,1	1,7±0,1
S	g kg^{-1}	6,7±0,2	15,1±1,0	7,4±0,4
VP	mL g^{-1}	0,022±0,001	0,027±0,001	0,053±0,002
ASE	m^2 g^{-1}	18,2±1,2	20,2±1,8	52,5±4,3

Valores médios ± desvio padrão (n=3); VP: volume de poros; ASE: área superficial específica; a: carbono orgânico (Walkley-Black); b: P disponível (Mehlich-1); nd: não determinado; bs: base seca. Modificado a partir de Faria et al. (2018) e Chagas et al. (2021).

3.3. Delineamento experimental

Foi empregado o delineamento em blocos casualizados com quatro repetições e seis tratamentos: 1) Controle – sem biochar e sem adubação mineral; 2) NPK – adubação mineral com NPK; 3) BCLE300 – aplicação de biochar pirolisado a 300 °C; 4) BCLE300+NPK – aplicação de biochar pirolisado a 300°C em conjunto com adubação mineral; 5) BCLE500 – aplicação de biochar pirolisado a 500 °C 6) BCLE500+NPK – aplicação de biochar pirolisado a 500° C em conjunto com adubação mineral. As parcelas do experimento medem 20 m^2 (5 m x 4 m) e eram compostas por 6 linhas espaçadas em 0,9 m entre si com 5 plantas m^{-1}, resultando em 55555 plantas ha^{-1}. A imagem aérea do experimento, durante a condução da décima safra, está representada na Figura 2.



Figura 2. Imagem aérea da área experimental, durante a condução da décima safra.

3.4. Condução da décima safra

Logo após a colheita da nona safra foram feitas coletas e análises de solo nas camadas de 0-20 cm. O plantio da décima safra, ocorreu no dia 7 de dezembro de 2023, de forma manual com um espaçamento de 20 cm entre plantas e 90 cm entre linhas. Nas parcelas que receberam adubação mineral (NPK, BCLE300+NPK e BCLE500+NPK), no momento do plantio, a adubação mineral foi aplicada na linha de semeadura (Figura 3). Devido a ocorrência de veranico, foi necessário realizar replantio das sementes que não germinaram, duas semanas após o plantio. Após 20 dias da germinação, realizou-se o desbaste para uniformizar as plantas nas parcelas.

Durante os estágios vegetativos V4 (quatro folhas desenvolvidas) (Figura 4) e V8 (oito folhas desenvolvidas), foram realizadas adubações de cobertura, exclusivamente nos tratamentos que receberam fertilização anual, utilizando cloreto de potássio e ureia. A adubação mineral foi realizada com base na interpretação da análise química do solo para cada safra, seguindo as recomendações para a cultura do milho com o objetivo de alcançar uma produtividade de 10 t ha^{-1} (Sousa e Lobato-2004).

Sempre que necessário, as plantas daninhas foram controladas por meio de capina manual, não sendo utilizado controle químico.



Figura 3. Adubação de plantio do milho com ureia e cloreto de potássio.



Figura 4. Adubação de cobertura com ureia e cloreto de potássio (plantas em V4).

3.5. Coleta e análise de solo

Ao final da décima safra, logo após a colheita, o solo foi amostrado na camada 0-20 cm com auxílio de um trado holandês (Figura 5). Em cada parcela, foram retiradas 3 amostras simples, uma amostra na linha de plantio e duas amostras entre linha, após a coleta, as amostras foram dispostas em balde e misturadas, para obter uma amostra composta. As amostras de solo foram passadas em peneira de malha de 2mm, secas ao ar e analisadas em seguida conforme Teixeira et al. (2017).



Figura 5. Procedimento de coleta de amostras de solo na área experimental.

3.6. Avaliação da produtividade do milho

A avaliação da produtividade das plantas de milho se deu por meio da produção dos grãos. Para isso, nas linhas centrais, foram colhidas espigas de seis plantas por parcela, escolhidas aleatoriamente (Figura 6). Logo após a colheita, as espigas de milho foram debulhadas manualmente e secas em estufa de circulação de ar forçada a 65°C, até atingir a umidade de 13% (Figura 7). Após a secagem, os grãos foram pesados para determinação da produtividade.



Figura 6. Espiga de milho coletada para estimativa da produtividade de grãos.



Figura 7. Secagem dos grãos de milho em estufa de circulação de ar.

3.7. Análise Estatística

A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk (α=0,05) e a homogeneidade das variâncias, pelo teste de Bartlett. Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de LSD de Fisher ($p< 0,05$), utilizando o software XLSTAT 2011.

4. Resultados e discussões

4.1. Indicadores de fertilidade do solo

Os resultados da análise de solo, antes do plantio da décima safra, estão apresentados na tabela 3. Os efeitos dos tratamentos nos indicadores de fertilidade do solo são descritos separadamente nos itens a seguir.

Tabela 3. Propriedades químicas do solo antes do plantio da décima safra.

Tratamento	pH	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H+Al	SB
	$CaCl_2$	mg dm^{-3}		$cmol_c$ dm^{-3}		
Controle	5,10ab	48,50bc	3,00ab	1,05ab	4,05abc	4,17ab
NPK	5,00ab	87,50a	3,15ab	1,35a	4,65ab	4,72ab
BCLE300	5,30a	30,00c	3,57ab	1,27ab	3,57c	4,92ab
BCLE300+NPK	5,20ab	87,50a	3,50ab	1,22ab	4,35abc	4,94ab
BCLE500	5,30a	30,50c	3,72a	1,37a	3,67bc	5,17a
BCLE500+NPK	4,90b	58,50b	2,75b	0,65b	4,90a	3,54b

Tratamento	CTC	V	Ca+Mg/K	Mat. Org.	N	C
	$cmol_c$ dm^{-3}	%	-	%	%	
Controle	8,22a	50,75ab	34,67b	2,32a	0,26a	2,32b
NPK	9,37a	50,00ab	21,68b	2,15a	0,17a	2,47ab
BCLE300	8,50a	58,00a	66,63a	2,15a	0,20a	2,78a
BCLE300+NPK	9,29a	52,75ab	21,30b	2,15a	0,20a	2,71a
BCLE500	8,85a	57,75a	66,96a	2,32a	0,17a	2,49ab
BCLE500+NPK	8,44a	42,00b	22,93b	2,25a	0,19a	2,70a

Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferenças estatísticas entre si pelo teste LSD de Fisher (P<0,05).

4.1.1. pH do solo, Cálcio e Magnésio (Ca^{2+} e Mg^{2+}), Soma de bases (SB) e saturação por bases (V)

Os resultados observados nas diferentes variáveis analisadas indicam uma tendência geral nos efeitos dos tratamentos com biochar de lodo de esgoto (BCLE). O pH foi significativamente mais alto nos tratamentos com biochar puro (300 e 500°C) em comparação ao tratamento BCLE500+NPK, possivelmente

devido à presença de cátions básicos como Ca^{2+}, Mg^{2+} e Na^{+}, comuns nos biochars, que contribuem para a alcalinização do solo. O valor de pH mais baixo no tratamento BCLE500+NPK pode ser associado à adubação mineral, que tende a acidificar o solo, além de possíveis interações entre o biochar e os fertilizantes, resultando em maior produtividade, o que pode levar à diminuição do pH pela maior absorção de cátions básicos (MORAES et al., 2021; D´AULERIO et al., 2020).

No que se refere ao cálcio (Ca^{2+}), o tratamento com BCLE500 apresentou maiores teores em comparação ao BCLE500+NPK, o que pode ser explicado pelo pH mais elevado, que favorece a disponibilidade de nutrientes (SILVA et al., 2023). Em relação ao magnésio (Mg^{2+}), o BCLE500 e o NPK proporcionaram maiores teores comparados à combinação de BCLE500+NPK, sugerindo que a maior produtividade no tratamento com a combinação de BCLE+NPK pode ter causado maior extração de cátions básicos, como Ca^{2+} e Mg^{2+}, do solo.

Maiores valores de soma das bases (SB) e de saturação por basesforam observados no tratamento BCLE500, o que pode ser atribuído ao fornecimento de cátios pelo BCLE e ao pH mais elevado e à menor produtividade na parcela, resultando em menor absorção de nutrientes. Já o tratamento com BCLE (300 e 500°C) apresentou maiores percentuais de saturação por bases em comparação ao BCLE500+NPK, indicando que a maior produtividade observada neste último tratamento pode ter levado à extração maior de cátions básicos do solo, refletindo uma maior demanda por esses nutrientes durante o desenvolvimento das culturas. Além de que, há um grande fornecimento de bases oriundas da aplicação dos BCLEs. Esses resultados indicam a importância das interações entre o biochar, os nutrientes do solo e a produtividade das culturas, que influenciam diretamente os parâmetros de fertilidade do solo.

4.1.2. Carbono

O teor de C do solo foi menor no Controle do que nos tratamentos com biochar (BCLE300, BCLE300+NPK e BCLE500+NPK), não havendo diferenças entre os demais tratamentos (Tabela 3). Esse resultado provavelmente está relacionado à menor produção de matéria seca no tratamento controle ao longo dos anos, o que resultou em um menor acúmulo de matéria orgânica após a

colheita e, consequentemente, em teores reduzidos de carbono orgânico no solo (MELO et al., 2022).

4.1.3. Potássio

BCLE300 e BCLE500 apresentaram os menores valores de K, similares apenas ao controle (Tabela 3). Esses resultados evidenciam a deficiência de K na composição dos biochars feitos com LE. Essa deficiência é causada pelas perdas desse nutriente no processo de tratamento de esgoto (LIU et al., 2020). Por outro lado, maiores concentrações de K foram observadas nos tratamentos que receberam aplicações anuais de NPK (NPK, NPK+BCLE300, NPK+BCLE500). Devido aos baixos teores de K, a aplicação exclusiva de biochar (BCLE300 e BCLE500) apresentou a maior Ca+Mg/K do que os demais tratamentos.

4.1.4. Fósforo

Os teores de P no solo, antes da implementação da décima safra, são apresentados na Figura 8. As parcelas que receberam as combinações de NPK + BCLE (300 e 500°C) apresentaram teores de P significativamente maiores do que os demais tratamentos (Figura 9). Essas diferenças podem ser atribuídas ao fato de que a combinação de duas fontes de nutrientes disponibiliza uma quantidade maior de P para o solo (SOUZA et al., 2022). Mesmo sob efeito residual de sete anos, a aplicação exclusiva de biochar (BCLE300 e BCLE 500) apresentou teores de P similares ao NPK e superior ao controle. Esses resultados demonstram que o BCLE realmente apresenta efeito residual de P de pelo menos sete safras de milho, confirmando o seu potencial para fonte de liberação lenta de P para as plantas.

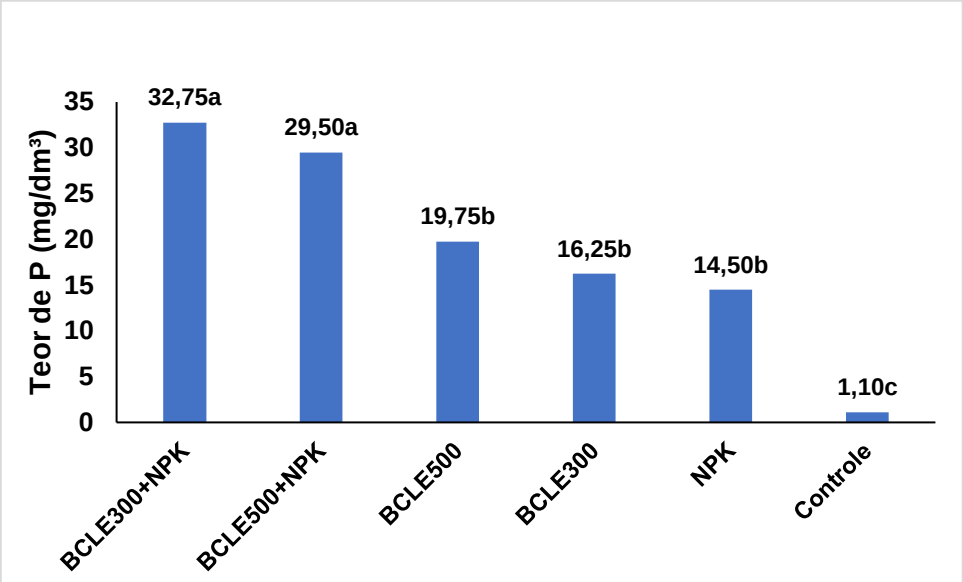


Figura 8. Teor de fósforo no solo sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto. Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferenças estatísticas entre si pelo teste LSD de Fisher (P<0,05).

O nível crítico de P em solos do Cerrado geralmente varia entre 8 e 15 mg dm^{-3}, dependendo do teor de argila do solo (SOUSA e LOBATO, 2004). Esses resultados evidenciam o potencial do BCLE como uma fonte de liberação lenta de fósforo (P), pois os níveis de P disponível foram mantidos acima do nível crítico no solo (SOUSA E LOBATO, 2004). Essa característica é especialmente vantajosa para solos intensamente intemperizados de regiões tropicais, que apresentam alta capacidade de adsorção de P e baixa disponibilidade desse nutriente para as culturas (OMOLO et al., 2020).

O P desempenha um papel crucial no desenvolvimento da planta, influenciando diretamente o crescimento radicular, a eficiência na absorção de nutrientes e a formação dos grãos (KHAN et al., 2021). A disponibilidade adequada desse nutriente é essencial para otimizar o rendimento da cultura, enquanto a deficiência de P pode limitar o potencial produtivo e comprometer a qualidade da colheita (MILLER et al., 2021).

Outros estudos já demonstraram a capacidade do BCLE em aumentar a concentração de P no solo (GARCÍA et al., 2021; MA et al., 2020). Isso ocorre devido ao elevado teor de P no LE e ao aumento de sua concentração durante

o processo de pirólise (GONÇALVES et al., 2021). Durante a pirólise, ocorrem perdas gasosas de elementos como C, H, O e N (WANG et al., 2020). A maior parte do P presente no LE se encontra na forma inorgânica, predominantemente como fosfato de alumínio, que é resistente às perdas por volatilização durante a pirólise a temperaturas inferiores a 700 ºC (ZHANG et al., 2019). Portanto, a conversão termoquímica do LE demonstra um grande potencial para ser utilizada como uma fonte de P para o solo (ALMEIDA et al., 2022).

Além disso, a aplicação de BCLE ao solo pode influenciar tanto a quantidade quanto a disponibilidade de P, em decorrência das alterações nas frações de P inorgânico (SANTOS et al., 2022). O BCLE tem a capacidade de adsorver cátions como Al^{3+}, Fe^{3+} e Ca^{2+}, o que pode reduzir a adsorção ou precipitação de P no solo, melhorando assim sua disponibilidade para as plantas (LI et al., 2021).

Estudos anteriores apresentaram resultados semelhantes quanto ao efeito residual de P no solo, mesmo após a suspensão da aplicação, como evidenciado no estudo de Fachini (2018). Além disso, outras pesquisas, como as de Liu et al. (2019), já demonstraram o potencial do BCLE em atender à demanda de fósforo (P) das plantas.

4.2. Avaliação de produtividade do milho

As combinações NPK + BCLE (300 e 500 °C) promoveram maiores produtividades de grãos em comparação com o controle e o BCLE500, sem diferença significativa em relação aos demais tratamentos (Figura 9). Essa sinergia entre o fertilizante NPK e o BCLE reflete uma maior disponibilidade imediata de nutrientes para a cultura, aliada ao efeito residual do BCLE na melhoria da retenção de nutrientes no solo (WANG et al., 2024). Assim, o uso do BCLE em conjunto com fertilizantes convencionais não apenas melhora a produtividade no curto prazo, mas também apresenta potencial para reduzir a necessidade de reaplicações frequentes, tornando o sistema agrícola mais sustentável e economicamente viável (ALI et al., 2024).

A produtividade está intimamente ligada a disponibilidade de nutrientes no solo, sendo que o nutriente presente em menor quantidade será o fator limitante da produção (ZHAO et al., 2021b). Ao relacionar a produtividade do milho com o

resultado da análise química do solo (Tabela 3 e Figura 9), fica evidente que a produtividade dos tratamentos que receberam apenas BCLE, foi limitada pelo K (Tabela 3). Conforme estabelece a Lei do Mínimo ou Lei de Liebig, o rendimento da safra é limitado pelo nutriente que está presente no solo em menor quantidade.

Outro ponto relevante é a resiliência do BCLE às condições de cultivo após anos de interrupção da aplicação (CHEN et al., 2024). A capacidade do BCLE em manter a produtividade, mesmo sob baixo teor de potássio, pode estar associada à melhoria na estrutura do solo e à liberação gradual de nutrientes durante o ciclo de cultivo (ZHANG et al., 2024).

Mesmo sob efeito residual e baixo teor de K, BCLE300 não apresentou diferença de produtividade quando comparada com os tratamentos que receberam doses anuais de NPK (NPK, BCLE300+NPK e BCLE500+NPK). Além disso, a aplicação exclusiva de BCLE (300 e 500 °C) apresentou médias de produtividade similares ao tratamento NPK. Esses resultados evidenciam o potencial do BCLE como uma alternativa viável à fertilização convencional, mesmo após oito anos da interrupção de sua aplicação, mantendo níveis desejáveis de produtividade. Ademais, quando combinado com outra fonte de nutrientes, o BCLE consegue alcançar produtividades equivalentes às da fertilização convencional, mesmo sem reaplicação constante, o que contribui para a diluição dos custos ao longo dos anos.

Os resultados obtidos corroboram os trabalhos de Figueiredo et al. (2021) e Figueiredo et al. (2024), que também destacaram a eficácia do BCLE em promover produtividades similares às alcançadas com fertilização convencional em culturas de milho.

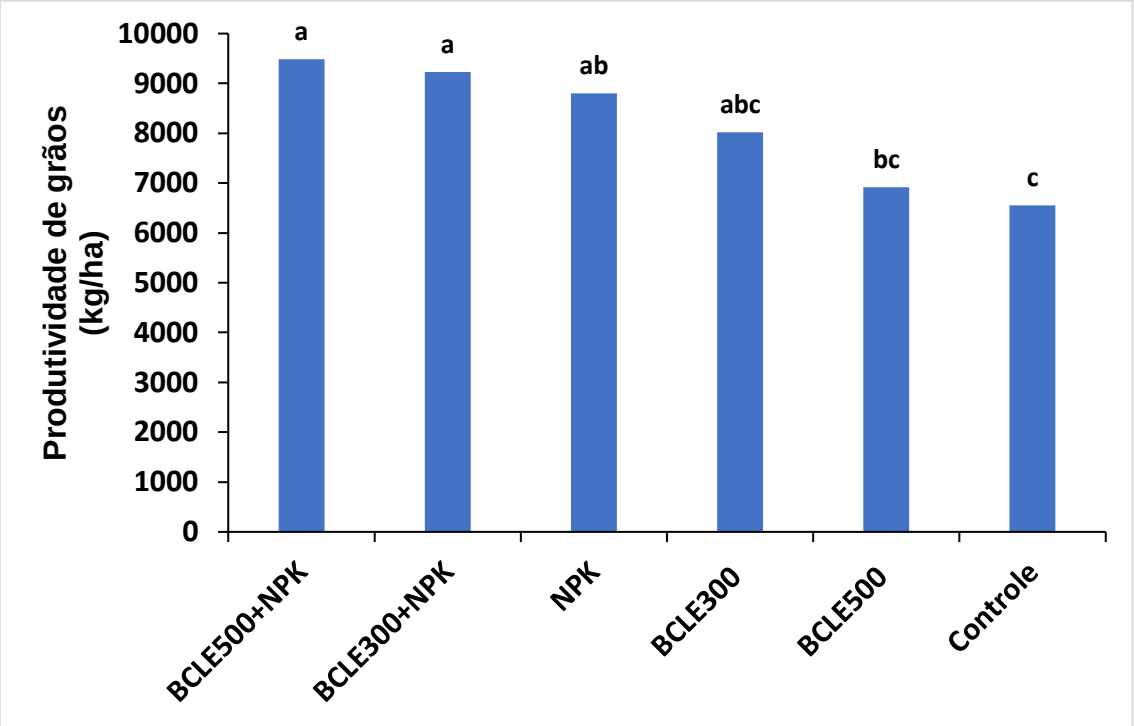


Figura 9. Produtividade de grãos de milho em solo cultivado sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto. Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferenças estatísticas entre si pelo teste LSD de Fisher (P<0,05).

5. CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo demonstraram o efeito residual dos BCLEs sobre os indicadores de fertilidade do solo e a produtividade de grãos de milho. Os teores de P disponíveis permaneceram acima do nível crítico para os solos do Cerrado, e acima do mínimo requerido pela cultura do milho, sugerindo que o BCLEs podem ser considerados como fertilizantes de liberação lenta desse nutriente. No entanto, apenas a aplicação do BCLE não foi o suficiente para suprir a demanda de K pela cultura, sendo necessária a suplementação do K. Quando combinado com o fertilizante mineral, os dois BCLEs resultaram uma maior produtividade do milho. Reforçando ainda mais a necessidade de suprir o fornecimento de K. Os dois BCLES produzidos em diferentes temperaturas, 300 °C e 500 ºC, apresentaram comportamento semelhante. Nesse sentido, levando em conta a demanda energética, o BCLE produzido a 300 °C pode ser mais vantajoso para o uso agrícola. Os resultados evidenciam o potencial do BCLE como uma forma eficiente e segura de uso agrícola do lodo de esgoto.

6. REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S.; CHAKRABORTY, A.; HOSSAIN, M. K. Effects of pyrolysis temperature and particle size on biochar physical and chemical properties. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2019.

AGUILERA, E.; POVEDA, E.; MARCO, A.; GRACIA, J. Removal of emerging contaminants and nutrients from urban wastewater by sorption on hydrochar. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 13, p. 12356-12366, 2017.

AHMAD BHAT, S.; GHOSH, S.; BARKA, M. E.; AZIZ, S.; ISLAM, M. N. Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: A systematic review. **Sustainability**, v. 14, n. 17, p. 11104, 2022.

ALMEIDA, J. M.; SANTOS, C. M.; LOPES, S. A.; FERREIRA, A. A. Biochar derived from sewage sludge as a potential phosphorus source in agriculture. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 14031–14043, 2022.

ALI, M. A.; MANCINELLI, R. Optimizing maize productivity and soil fertility: Insights from tillage, nitrogen management, and hydrochar applications. **Land**, v. 13, n. 8, p. 1329, 2024.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, p. 180214, 2018.

CAMPOS, C. M.; SILVA, M. P.; LIMA, J. R.; OLIVEIRA, R. F. Municipal sewage sludge as a fertilizer: An overview of its use in Brazil. **Sustainability**, v. 13, n. 7, p. 3611, 2021.

CEBALLOS, C.; CASTILLO, M.; FERNÁNDEZ, J. A.; MONTES, A.; BERMUDEZ, J. Biochar application from wastewater sludge improves soil organic carbon and nutrient content in an acidic soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 55363–55373, 2021.

CHAGAS, J. K. M. Efeito temporal do biochar de lodo de esgoto nos indicadores de fertilidade e ambientais do solo. 2021. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

CHEN, D.; XU, Q.; ZHANG, J.; LI, X.; WANG, Y. Pyrolysis characteristics and organic transformation mechanism of sewage sludge under different pyrolysis temperatures. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, p. 130234, 2022.

CHEN, Liang; HU, Zhenzhen; HUANG, Xia; SHEN, Yongfu; HE, Feng. Long-term effects of biochar on soil properties and crop productivity under different cultivation systems. **Science of the Total Environment**, v. 847, 2024, p. 157492.

CHEN, W.; LI, Q.; SUN, Y.; ZHAO, R.; ZHANG, W. Conversion of sewage sludge to biochar via pyrolysis: A critical review on cost, yield, and material properties. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122408, 2020.

CHEN, Y.; SHEN, Y.; WANG, K.; GUO, D. A critical review on the biochar properties and their utilization in sewage sludge pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 166-174, 2017.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB. Sistemas de esgotamento. Disponível em: http://www.caesb.df.gov.br/esgoto/sistemas-de-esgotamento.html. Acesso em: 02/10/2024.

CUI, L.; SUN, Y.; SHI, A.; ZHAO, S.; WANG, H. Effect of pyrolysis temperature on the characteristics of biochar derived from sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 141, p. 104616, 2019.

FACHINI, J. Efeitos residuais do biochar de lodo de esgoto nas propriedades químicas e biológicas do solo, na nutrição e produtividade do milho. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

FANG, J.; LI, B.; XUE, Q.; YANG, H.; CHEN, H. Impact of pyrolysis temperature on the nutrient and heavy metal behavior of biochar derived from sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 153, p. 104964, 2021.

FARIA, W. M.; REINERT, D. J.; WEILER, D. A.; BORTOLUZZI, E. C.; KORNDÖRFER, G. H. Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 4, p. 505–519, 2018.

FIGUEIREDO, C.; SANTOS, I.; CIRO, G.; SILVA, J.; SCHNEIDER, B. Influence of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of biochar from sewage sludge. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 6, p. 881–889, 12 maio 2018.

FIGUEIREDO; PEREIRA; OLIVEIRA; CARDOSO. Uso de biochar de lodo de esgoto na agricultura: melhoria da fertilidade e aumento da produtividade do milho. **Universidade de Brasília**, 2024.

FIGUEIREDO; SOUZA; SILVA; MORAES. Avaliação do potencial do biochar de lodo de esgoto como fertilizante na cultura do milho. **Universidade de Brasília**, 2021.

FIJALKOWSKI, K.; RORAT, A.; GROBELAK, A.; KACPRZAK, M. J. The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 1126–1136, 2017.

GARCÍA, A.; TIRADO, F.; RIVERA, R.; GONZÁLEZ, C. Phosphorus availability in a biochar amended soil: A case study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 301, p. 107052, 2021.

GARCÍA, M. F.; MARIN, B.; MENDEZ, A. M. Efficacy of sewage sludge derived biochar on enhancing soil health and crop productivity in strongly acidic soil. **Frontiers in Environmental Science**, 2021.

GONÇALVES, J. F. R.; ARAÚJO, T. S.; BORGES, R. S.; FREITAS, R. F. Influence of pyrolysis temperature on the phosphorus content of sewage sludge biochar. **Waste Management**, v. 129, p. 160-167, 2021.

GONZALEZ, J. M.; CARMONA, A.; LLORENS, M.; CARRILLO, F. Phosphate fertilizers and their role in enhancing phosphorus availability in tropical soils. **Agronomy**, v. 11, p. 216, 2021.

HUANG, Y.; FANG, Y.; CHENG, W.; ZHU, L. Biochar production from sewage sludge: A review and prospect towards energy recovery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 102, p. 111-123, 2019.

HUANG, Y.; SHEN, Y.; LU, H. Global Phosphorus Scarcity: Past, Present, and Future. **Trends in Plant Science**, v. 26, n. 1, p. 3-5, 2021.

JIANG, Z.; LI, J.; WANG, T.; ZHANG, L.; GUO, L.; LIU, Y. Long-term effects of sewage sludge biochar on soil properties and crop yield: A field study in Northeast China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, n. 5, p. 2193-2206, 2023.

KANG, Y.; LIANG, Y.; LI, H. Effect of Macronutrient Balancing on Crop Yield and Soil Health. **Agricultural Systems**, v. 179, p. 102751, 2020.

KIZITO, S.; BANSAL, S.; ADAMS, D. Pyrolysis temperature effect on nitrogen losses during biomass pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 134-145, 2019.

KHAN, M. I. R.; KHAN, M. N. Phosphorus Management for Sustainable Crop Production: Impact on Root Growth, Nutrient Uptake, and Grain Formation. **Field Crops Research**, v. 267, p. 108118, 2021.

KIM, I. S.; LEE, S. H.; PARK, J. H.; KIM, J. G.; LEE, S. Y. Changes in microbial community and organic matter characteristics during sludge composting. **Journal of Hazardous Materials**, v. 383, p. 121150, 2020.

KUMAR, A.; RANI, R.; YADAV, A. Biochar application and its impact on soil properties and nutrient availability: A review. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 550, 2022a.

KUMAR, A.; SINGH, M.; KUMAR, S. Nutrient Deficiency and Soil Testing: Implications for Crop Yield Prediction and Management. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 185, n. 3, p. 468-478, 2022b.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2021.

LIMA, L. B.; SILVA, E. P.; CAVALCANTI, M. A.; SOUSA, R. M.; ALMEIDA, R. C. The role of biochar in improving soil fertility: potential benefits and challenges. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. 1-12, 2022.

LIU, W.; WANG, Q.; ZHANG, X. Potassium Leaching and Its Impact on the Nutrient Profile of Biochar Produced from Sewage Sludge. **Bioresource Technology**, v. 311, p. 123489, 2020.

LIU, X.; CHEN, X. Phosphate Rock Reserves and Production in Major Regions: Trends and Future Prospects. **Minerals**, v. 11, n. 7, p. 763, 2021.

LIU, X.; ZHANG, X.; SUN, Y. Phosphorus release from biochar of sewage sludge: Effects of pyrolysis temperature and phosphorus speciation. **Chemosphere**, v. 226, p. 816-825, 2019.

MA, Z.; HONG, Y.; WANG, X.; YU, C.; LI, Y. Effects of biochar application on phosphorus dynamics in a sandy soil. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 1, p. 104-115, 2020.

MELO, L. A.; COSTA, A. F. Effects of BCLE and mineral fertilizers on biomass production and organic carbon accumulation in different soil types. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 3, p. 342-353, 2022.

MILLER, R. M.; TANAKA, S. Impact of Phosphorus Deficiency on Crop Yield and Quality: An Analysis Across Different Soil Types. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 184, n. 1, p. 35-49, 2021.

MIYAMOTO, S.; MUIR, J. P.; EL-SHARKAWY, M. A. Biochar application in soils: A review of the effects on soil properties and crop yields. **Sustainable Agriculture Reviews**, v. 51, p. 1-25, 2023.

OMOLO, E.; KAMAL, M.; GOKUL, R.; KARIUKI, S. Biochar as a slow-release phosphorus source in tropical soils: Impacts on crop performance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 299, p. 106974, 2020.

SANCHEZ, P. A. Soil fertility and soil management: Facing new challenges. **Geoderma**, v. 355, p. 113912, 2019.

SANTOS, F. C.; SILVA, J. L. Soil Nutrient Management and Crop Productivity: A Review. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 3, p. 1234-1245, 2020.

SANTOS, G. G.; CASTRO, G. R.; OLIVEIRA, J. P. Uso de gesso agrícola e lodo de esgoto na melhoria de propriedades físicas e na adsorção de metais pesados em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

SANTOS, J. R.; BALTAR, A. C.; LEITE, J. M.; VIEIRA, F. A. Phosphorus availability and retention in soil amended with biochar from sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 17402–17412, 2022.

SILVA, C. A.; NOGUEIRA, D. A.; PEREIRA, J. R.; RIBEIRO, H. S. Biochar from sewage sludge: An effective soil amendment to improve nutrient availability. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 45698–45708, 2021.

SILVA, Rafael C.; PEREIRA, André L.; OLIVEIRA, Beatriz M.; SANTOS, Carla F. Biochar from sewage sludge improves soil pH and nutrient availability. **Journal of Environmental Management**, v. 302, p. 113984, 2022.

SMITH, A. R.; BROWN, K. L.; THOMPSON, R. P. Assessment of sewage sludge contaminants and implications for agricultural use. **Journal of Environmental Management**, v. 247, p. 345-356, 2019.

SOHI, S. P.; LOPEZ-CAPEL, E.; KRULL, E.; BOL, R. Biochar's roles in soil and climate change. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 45, p. 55-82, 2020.

SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture and Horticulture**, v. 32, n. 2, p. 127–138, 2016.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (org.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos tropicais: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180162, 2019.

SOUZA, C. F.; LIMA, R. T. Efeito da combinação de fontes de nutrientes na dinâmica do fósforo no solo e na produtividade das culturas. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 951-964, 2022.

SUN, X. et al. Effects of biochar from sewage sludge on soil properties and crop yield in pot experiments. **Sustainable Agriculture Research**, v. 10, n. 1, p. 82-93, 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TORRI, S. I.; PARSONS, J. R.; DE VOOGT, P. Phosphorus recovery from sewage sludge by thermochemical processes: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 299-309, 2017.

WANG, H.; LIAO, Q.; HE, Y.; LI, Y.; LIU, W. Gaseous emissions during pyrolysis of sewage sludge: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 40048–40064, 2020.

WANG, H.; ZHANG, W.; LI, X.; CHEN, Z. Mechanisms of potassium loss during wastewater treatment and its implications for recycling. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 10, p. 9818–9829, 2019.

WANG, J.; LIU, Y.; ZHAO, Q.; YANG, M. Effects of sludge composition and hydraulic retention time on the performance and methane production of anaerobic digestion for treating sludge after primary sedimentation. **Environmental Science & Technology**, 2020.

WANG; ZHANG; LI; ZHAO; LIU; ZHENG. Effects of Combined Biochar and Chemical Fertilizer Application on Soil Fertility and Properties: A Two-Year Pot Experiment. **Sustainability**, v. 16, n. 20, p. 8780, 2024.

WANG, Z.; LI, H.; TIAN, J.; XU, X. Recent advances in thermal drying technologies for sewage sludge: A review. **Environmental Technology Reviews**, 2023.

WOOLF, D.; AMLINGER, F.; MAJOR, J.; LEHMANN, J.; COLLISON, M. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 6345, 2021.

YANG, Xian; ZHANG, Chao; ZHANG, Ying; LI, Xue; LIU, Shuhua. Impact of biochar on the soil water retention curve and water availability in a red soil. **Geoderma**, v. 363, p. 114143, 2020.

YAO, Ying; LI, Xue; LIU, Shuhua; ZHANG, Chao; ZHANG, Ying. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: Mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 4, p. 2360-2368, 2019.

XIA, Y.; ZHANG, L.; LI, Y.; XIE, K. Soil organic matter content influences the functional diversity of microbial communities and soil enzyme activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 146, 2020.

ZHANG, Huan; WANG, Jing; LIU, Zhiyong; ZHANG, Ming; LI, Qing; LI, Jian. Phosphorus availability and transformation in sewage sludge-derived biochars

and their effects on soil phosphorus dynamics. **Science of The Total Environment**, v. 777, p. 146087, 2021a.

ZHANG; LIU; FANG; ZHOU; JIANG. Biochar enhances crop productivity by improving soil structure and nutrient retention in nutrient-poor soils. **Geoderma**, v. 432, 2024, p. 116005.

ZHANG, Ming; WANG, Jing; LIU, Zhiyong; ZHANG, Huan; LI, Qing; LI, Jian. Influence of biochar on phosphorus dynamics in soils: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 803, p. 149923, 2023b.

ZHANG, Ping; LI, Zhong; LIU, Wei; ZHANG, Huan; LI, Qing; ZHANG, Ming; LI, Jian. Biochar derived from sewage sludge: Current research and potential applications. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 2, p. 1563-1578, 2023a.

ZHANG, Xinyi; LIU, Yue; WANG, Hao; LI, Zhen; ZHANG, Lei; LI, Qian. Thermal conversion of biomass: Fundamentals, technologies, and environmental impacts. **Bioresource Technology**, v. 336, p. 125352, 2021.

ZHANG, Xinyi; LIU, Yue; WANG, Hao; LI, Zhen; ZHANG, Lei; LI, Qian. Understanding phosphorus dynamics in soil-plant systems for improved phosphorus management in agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114059, 2023.

ZHAO, Bin; LIU, Hui; WANG, Jian; LI, Ying; LIU, Qing. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122326, 2021.

ZHAO, X.; CHEN, Y.; ZHANG, L. Nutrient availability and crop yield: Identifying the limiting nutrient for optimal crop production. **Field Crops Research**, v. 266, p. 108152, 2021b. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108152.

ZOU, Xiu; LI, Xue; LIU, Yan; ZHANG, Wei; WANG, Yuying. An integrated study on the compositional characteristics and stabilization mechanisms of sewage sludge during aerobic composting. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, p. 124493, 2021.