

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

**CINÉTICA DE LIBERAÇÃO DE POTÁSSIO DE FERTILIZANTE À
BASE DE BIOCÁRVÃO DE LODO DE ESGOTO**

LUDMILA RAULINO DE SOUZA

BRASÍLIA, DF

2023

LUDMILA RAULINO DE SOUZA

**CINÉTICA DE LIBERAÇÃO DE POTÁSSIO DE FERTILIZANTE À BASE DE
BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO**

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 Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo

BRASÍLIA, DF

2023

Souza, Ludmila Raulino

Cinética de liberação de potássio de fertilizante à base de biocarvão de lodo de esgoto/ Ludmila Raulino de Souza; orientador Cícero Célio de Figueiredo. – Brasília, 2023.

42 p.: il.

Monografia (Graduação – Agronomia) – Universidade de Brasília, 2023.

1. Biochar. 2. pirólise. 3. fertilizantes especiais. 4. potássio. I. Figueiredo, Cícero Célio de, orient. II. Título.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: Ludmila Raulino de Souza

Título: Cinética de liberação de potássio de fertilizante à base de biocarvão de lodo de esgoto.

Ano: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias dessa monografia e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação, e nenhuma parte desse relatório pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

LUDMILA RAULINO DE SOUZA

**CINÉTICA DE LIBERAÇÃO DE POTÁSSIO DE FERTILIZANTE À
BASE DE BIOCARVÃO DE LODO DE ESGOTO**

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 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. Jóisman Fachini
Examinadora

MSc. Roberto Guimarães Carneiro
Examinador

Este trabalho é dedicado primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida, e também aos meus pais Carmen e Ivan que me guiaram desde o começo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me guiado até aqui e me fazer superar cada obstáculos que surgiram durante essa caminhada.

Aos meus pais Carmen Silvia Raulino de Souza e Ivan César de Souza, nos quais se dedicaram ao máximo para eu ter direito a uma educação de qualidade, proporcionaram recursos financeiros para eu cursar uma faculdade em tempo integral, além disso contribuíram com muita sabedoria por meio de conselhos. Às minhas irmãs Lorena e Layane que sempre me apoiaram independentemente de qualquer sonho que tivesse. Ao meu namorado Carlos Miguel que está comigo nos melhores e piores momentos sempre. Amo muito vocês!

Aos amigos, Jainara, Maíra, Rafael, Andreza, Camila, Lamara, Maria Eduarda, Luan, que conquistei durante a graduação que foram essenciais para o meu desempenho e alegrias durante esses anos.

Agradeço a equipe de docentes e funcionários da Universidade de Brasília, nos quais contribuíram de forma excelente para minha formação.

Muito obrigado ao meu orientador, Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo, que me orientou durante o estágio obrigatório, PIBITI e nesse presente trabalho, que me ensinou tanto em conhecimentos acadêmicos quanto em vivências e conselhos.

Ao grupo do Laboratório de Estudos da Matéria Orgânica do Solo, como colegas de projeto como Ludmila, Gabriel, Ivan, Rogério, Jéssica, também a Técnica Priscila e Dra. Jóisman pelas inúmeras ajudas e ensinamentos.

Á minha colega Ornelle pelos dias juntas trabalhando no projeto, risadas e aprendizados.

Agradeço imensamente a todos!

*“A mente que abre a uma nova ideia, jamais
voltará ao seu tamanho original.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

Cinética de liberação de potássio de fertilizante à base de biochar de lodo de esgoto

O tratamento térmico por pirólise tem se destacado como alternativa para possibilitar a reciclagem do lodo de esgoto na agricultura. O produto sólido da pirólise é identificado como biochar ou biocarvão e, dependendo das suas características físico-químicas e doses utilizadas, pode atuar como fertilizante sustentável e substituir os fertilizantes minerais solúveis. Apesar desse potencial, o biochar de lodo de esgoto apresenta baixa concentração de potássio. Como alternativa para solucionar essa deficiência, o biochar tem sido enriquecido com fontes minerais de potássio por meio de granulação e peletização, dando origem a um fertilizante de liberação lenta. Ainda há dúvidas sobre a liberação de potássio (K) desses fertilizantes em solos de diferentes texturas. Logo o objetivo desse estudo foi avaliar a cinética de liberação de potássio de fertilizante à base de biochar de lodo de esgoto quando aplicado em solos de textura argilosa e arenosa. Para tal, experimento de incubação foi realizado por 30 dias. Em potes plásticos foram acrescentados 100 g de solo e 5 g de cada fertilizante enriquecido. Os recipientes contendo (solo + sachê com fertilizante) foram incubados e as avaliações ocorreram em diferentes períodos (12 horas, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 e 30 dias). Os fertilizantes em formato de grânulo e pellet liberaram K de forma gradativa e o fertilizante convencional cloreto de potássio (KCl) liberou cerca de 90% do K aplicado em apenas 12 horas. Entre os fertilizantes estudados, o pellet apresentou os melhores resultados, podendo ser classificado como um fertilizante de liberação lenta. Seu uso pode reduzir perdas de K por lixiviação e gerar um avanço tecnológico tanto na redução de uso dos fertilizantes minerais a cada safra, quanto para promover uma destinação ambientalmente correta para o lodo de esgoto, além de diminuir a dependência do Brasil frente a importações de fertilizantes.

Palavras-chave: Biochar, pirólise, fertilizantes especiais, potássio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico referente a importação brasileira de Fertilizantes de janeiro a novembro dos anos de 2018 a 2022 – em milhões de toneladas.....	16
Figura 2. Produção mundial de potássio.....	17
Figura 3. Importações totais de fertilizantes.....	17
Figura 4. Fertilizantes de biochar enriquecidos com K na forma de pellet (A) e grânulo (B).....	21
Figura 5. Solo de textura arenosa, Neossolo Regolítico (A), Solo de textura argilosa, Latossolo Vermelho (B).....	22
Figura 6. Sachê selado contendo 5 g de fertilizante.....	24
Figura 7. Sequência mostrando os fertilizantes em sachês, pesagem das amostras de solo e montagem das unidades de incubação.....	24
Figura 8. Aplicação de água para manter os teores de água iniciais de cada solo.....	25
Figura 9. Frascos em incubação.....	26
Figura 10. Solo seco e destorreado.....	26
Figura 11. Pesagem e solo com a solução extratora.....	27
Figura 12. Sequência de tarefas para a leitura de teores de K.....	27
Figura 13. Comparação da liberação de K em diferentes formas físicas. A) Solo arenoso. B) Solo argiloso.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas e físicas dos solos estudados.....22

Tabela 2. Concentração de macronutrientes em organominerais de BLE enriquecidos com K.....23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Biochar de lodo de esgoto: Caracterização e importância agroambiental	14
2.2. Importância do potássio: crise e importação.....	15
2.3. Fertilizantes a base de biochar de lodo de esgoto enriquecidos com potássio.	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto	21
3.2. Condução do experimento	21
3.3. Análises laboratoriais.....	25
3.4. Análise estatística	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Mecanismo de liberação lenta de K	28
4.2. Influência da tecnologia de granulação e peletização na liberação de K.....	30
4.3. Liberação do fertilizante em diferentes tipos de solos	31
5. CONCLUSÕES.....	34
6. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 220 mil toneladas de lodo de esgoto (LE) são geradas por ano nos grandes centros urbanos do Brasil (PEDROZA et al., 2013) e esse resíduo tem como principal destinação aterros sanitários, apesar do potencial para uso como insumo em diferentes atividades como na agricultura (FERREIRA, 2019). O Distrito Federal (DF) apresenta uma das maiores taxas de crescimento populacional do Brasil (IBGE, 2023), que conseqüentemente gera um grande volume de esgoto e resultando na produção de cerca de 400 toneladas de LE por dia (CAESB, 2023). Diferentemente de outros centros urbanos industrializados, o LE produzido no DF tem origem predominantemente doméstica, tendo sua principal limitação para o uso agrícola a presença de microrganismos com elevado potencial de contaminação socioambiental.

Atualmente são vários os estudos que comprovam a eficiência do uso do LE na agricultura (FREDDI, 2019; VIANA, 2022; LIMA et al., 2020; KEHERWALD, 2021). No Brasil, a legislação que asseguram o uso correto do LE na agricultura é a Resolução CONAMA 498/2020. No entanto, devido a presença de metais pesados e patógenos o uso LE pode ser negligenciado devido ao risco de contaminação, sendo assim, uma alternativa para reciclagem do LE na agricultura é o tratamento térmico por pirólise.

A pirólise tem se destacado como uma alternativa para viabilizar o uso agrícola do LE. O produto sólido da pirólise é denominado biocarvão ou biochar e apresenta características químicas e físicas desejadas para um fertilizante, como aumentar as reservas de nutrientes, atuar como condicionante do solo e trazer benefícios que gerem maior produtividades (ANGIN, 2012; SANTOS, 2022 ; YUAN et al., 2016; ALVARENGA et al., 2016; KLEEMANN et al., 2017). Pesquisas realizadas no mundo todo mostram que o biochar de LE (BLE) é capaz de apresentar diversos usos na agricultura. Entre eles substituir fertilizantes minerais solúveis na produção de milho no Distrito Federal, Brasil (CHAGAS, 2021), o BLE é um produto que promove melhoria ambiental e um grande avanço tecnológico segundo estudo realizado na China (ZHAO, 2023), além disso, nos Estados Unidos, o BLE se mostrou capaz de melhorar características do solo para a produção de beterraba (ALVES, 2021). No entanto, a principal limitação do uso do BLE como fertilizante é a sua baixa concentração de potássio (K). Diferentemente do fósforo (P), o BLE não é uma boa fonte de K, pois o LE é considerado uma matéria-prima pobre nesse nutriente (KIRCHMANN et al., 2016).

No geral, os solos brasileiros são naturalmente pobres em formas disponíveis de K (BERNARDI et al., 2002) e apresentam predominantemente baixa capacidade de troca catiônica aumentando, assim, as perdas de K via lixiviação e reduzindo a eficiência de uso de fertilizantes potássicos (CHENG et al., 2017). Sendo assim, altas doses de fertilizantes potássicos são aplicadas a cada safra, pois O K é um nutriente de extrema importância para o desenvolvimento da planta, ele participa da translocação de açúcares e ácidos orgânicos para outros órgãos da planta, necessários para o enchimento de grãos (BENATO, 2020).

Entre as fontes de K mais usadas na agricultura está o cloreto de potássio (KCl), devido sua alta solubilidade em água e disponibilidade rápida de nutrientes, ele está propício a lixiviação (VELOSO, 2023). Com isso, torna-se necessário a produção de novos fertilizantes que apresentem uma liberação mais gradativa desse nutriente para minimizar perdas de K, aumentando a eficiência do uso do fertilizante.

O enriquecimento do BLE com fontes minerais potássicas por meio de granulação e peletização pode tornar o BLE em um fertilizante completo para agricultura. Estudos com o fertilizante à base de biochar de lodo de esgoto enriquecido com K (BLE-K) vem demonstrando o potencial deste produto para utilização como fertilizante de liberação lenta, aumentando a eficiência de uso de K e reduzindo as perdas por lixiviação (FACHINI, 2021b). No entanto, os estudos com BLE enriquecido são recentes. Sendo assim, o BLE-K necessita ser avaliado quanto à sua dinâmica de liberação de K em solos com diferentes texturas, uma vez que os solos argilosos possuem maior capacidade de retenção desse nutriente do que solos de textura arenosa (RONQUIM, 2020). Fertilizantes de liberação lenta de K vem sendo estudada como uma alternativa para a redução de perdas desses nutrientes quando aplicado ao solo (DU et al., 2006).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018) no Brasil há 13 classes de solos e entre elas está o Latossolo Vermelho e o Neossolo em que ambos são bastante usados na agricultura, todavia apresentam características distintas. O Latossolo Vermelho é poroso, profundo, bem drenado, muito permeável, apresenta cor acentuada devido à presença de óxidos de ferro (SOUSA; LOBATO, 2021). Já o Neossolo é um solo de textura arenosa, pouco evoluído e sem presença de um horizonte diagnóstico (SANTOS, 2018), além disso é um solo hidromórfico (ALVES, 2019). Logo, devido a representatividade no cerrado,

características e texturas distintas, os solos escolhidos são ideais para testes de potenciais fertilizantes e comparação de liberação de nutrientes.

Portanto, há necessidade de se estudar a dinâmica de liberação do K do FE ao longo do tempo comparado com fertilizante mineral solúvel. Adicionalmente, também é preciso compreender a influência da forma física do BLE-K (grânulo e pellet) na liberação de K em diferentes solos ao longo do tempo. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica temporal de liberação de K oriundo dos fertilizantes enriquecidos quando aplicados em diferentes tipos de solo do cerrado brasileiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biochar de lodo de esgoto: Caracterização e importância agroambiental

De acordo com dados publicados em 2022 pela Organização das Nações Unidas (ONU), o planeta Terra tem atualmente 8 bilhões de habitantes e esse número cresce de forma acelerada e junto com ele a quantidade de resíduos de LE. Esse resíduo quando destinados de forma incorreta pode trazer riscos socioambientais.

Há diferentes disposições para o LE, sendo a utilização na agricultura a mais promissora, uma vez que o LE contém matéria orgânica e nutrientes para o desenvolvimento das plantas (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Devido a sua composição, o LE pode ser usado como fertilizante e condicionador do solo, contribuindo para a melhoria de algumas características do solo como taxa de infiltração e capacidade de retenção de água (ANGIN, 2012).

Entretanto, os microrganismos patogênicos e poluentes orgânicos presentes no LE podem limitar o seu uso agrícola (TSUTIYA et al., 2002). Como alternativa, métodos termoquímicos vêm demonstrando grande potencial para realizar o tratamento e reciclagem do LE, pois esse método auxilia na eliminação dos organismos patogênicos, além de melhorar a microbiota do solo (JAYARAMAN; GOKALP, 2015).

Entre os métodos termoquímicos está a pirólise, que nos últimos anos se destacou como uma ótima alternativa para transformar LE em fertilizantes. O processo de pirólise resulta em três subprodutos: bio-óleo, biogás e o biochar. Sendo assim, após processo de pirólise o LE é transformado em biochar de LE (BLE), no qual fica isento de organismos patogênicos, rico em carbono e contém nutrientes como P, cálcio (Ca) zinco (Zn) e também o K mas esse com uma pequena concentração (PAZ-FERREIRO et al., 2018). O BLE apresenta alto teor de nutrientes, em especial N e P (LIU et al., 2018) porém, apresenta baixa concentração de K devido a sua matéria prima LE ser pobre nesse nutriente, pois durante o tratamento do esgoto o K é levado com água e sais solúveis, não sendo incorporado na parte sólida de LE (KIRCHMANN et al., 2016).

Estudos realizados após aplicações de biochars derivados de matérias primas diferentes mostram aumentos de pH, CTC, teor de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes (YUAN et al., 2016; ALVARENGA et al., 2016; KLEEMANN et al., 2017). Além disso, também foram identificados aumentos de produtividades nas culturas

devido a maior absorção de nutrientes pelas plantas após a aplicação do biochar (GWENZI et al., 2016; SOUZA & FIGUEIREDO, 2016; FARIA et al., 2018). Ademais, o biochar apresenta aptidão para reter elementos, melhorando, assim, a disponibilidade de nutrientes para as plantas (LEHMANN et al., 2011).

Devido à capacidade de absorção e retenção, o biochar reduz a lixiviação de nutrientes no solo devido à presença de cargas negativas na superfície do biochar (GAO et al., 2016). Um estudo realizado com BLE resultou em aumento de retenção de nutrientes como (nitrogênio) N e K no solo, isso acontece devido ao BLE carregar uma carga negativa geral em superfície, logo íons com cargas positivas tem facilidade em ser absorvidos (YUAN et al., 2016). Com isso, esses biochars puros quando aplicados nos solos já trazem resultados, mas o mesmo pode ser enriquecido com nutrientes a fim de obter um produto mais completo. Um estudo realizado com fertilizantes à base de biochar, produzidos a partir de cama de frango e casca de café enriquecidos com ácido fosfórico e óxido de magnésio, em combinação com superfosfato triplo mostrou que a liberação de P foi mais lenta, aumentou o teor desse nutriente e aumentou o crescimento na planta quando comparado com a aplicação apenas do superfosfato triplo (CARNEIRO et al., 2021). Além disso, o biochar produzido a partir de palha de arroz enriquecido com bentonita e ácido húmico apresentou resultados que reduziu a lixiviação de N e forneceu nutrientes principalmente para as fases de despona e maturação no cultivo de arroz (DONG, 2020).

2.2. Importância do potássio: crise e importação

No mundo, acima de 95% da produção de K é utilizada como fertilizante, sendo 90% na forma de KCl (ANM, 2017). Entre os macronutrientes mais utilizados pela planta está o K perdendo apenas para o N. A sua função é baseada no balanço iônico nas células vegetais, ele não atua em funções estruturais, mas está relacionado e envolvido em diversas reações na forma de catalisador (BIDWEL, 1974). Além disso, é encontrado ligado a enzima piruvato-quinase, auxiliando na respiração celular e no metabolismo de carboidrato (MEYER et al., 1973). Esse elemento atua na síntese de carboidrato e na síntese de proteína, nas quais afetam diretamente a fotossíntese (KINPARA, 2003).

De maneira geral, os solos brasileiros são carentes de K, pois a forma solúvel desse nutriente que é utilizada pela planta pode ser lixiviada do perfil do solo com

facilidade, logo mesmo que esses solos tenham uma rocha matriz rica desse nutriente presente, não significa que ele estará disponível para a planta, pois a baixa CTC dos solos brasileiros afeta a retenção de K no solo (KINPARA, 2003).

O Brasil ocupa a quarta posição mundial de maior consumidor de fertilizantes, ficando atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos (SAE, 2020). A produção nacional de fertilizante não é suficiente para atender a demanda, tornando o Brasil altamente dependente das importações de fertilizantes (SAE, 2020).

No ano de 2020 mais de 80% dos fertilizantes consumidos no Brasil foram importados e menos de 20% utilizados da produção nacional (ANDA, 2021). Com isso, é evidente a dependência frente a importação de fertilizantes para atender a demanda brasileira, além de apresentar um crescimento a cada ano conforme análises de histórico de importação de fertilizante do Brasil, chegando a crescimento de aproximadamente 31% apenas de 2018 a 2021 (Boletim logístico, 2022) (Figura.1).



Figura 1. Importação brasileira de Fertilizantes de janeiro a novembro dos anos de 2018 a 2022 – em milhões de toneladas. Fonte: COMEXSTAT- ELABORAÇÃO GELOG- SULOG- CONAB.

Os principais nutrientes importados são N, P e K. De acordo com dados divulgados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a dependência externa por fertilizantes é de 55% de P, 76% de N e 94% de K. Dessa forma, K é o macronutriente mais aplicado e aquele mais importado no Brasil.

Atualmente, quase 80% da produção mundial de potássio está concentrada em quatro países: Canadá, Rússia, Bielorrússia e China (OSAKI, 2022) (Figura 2).

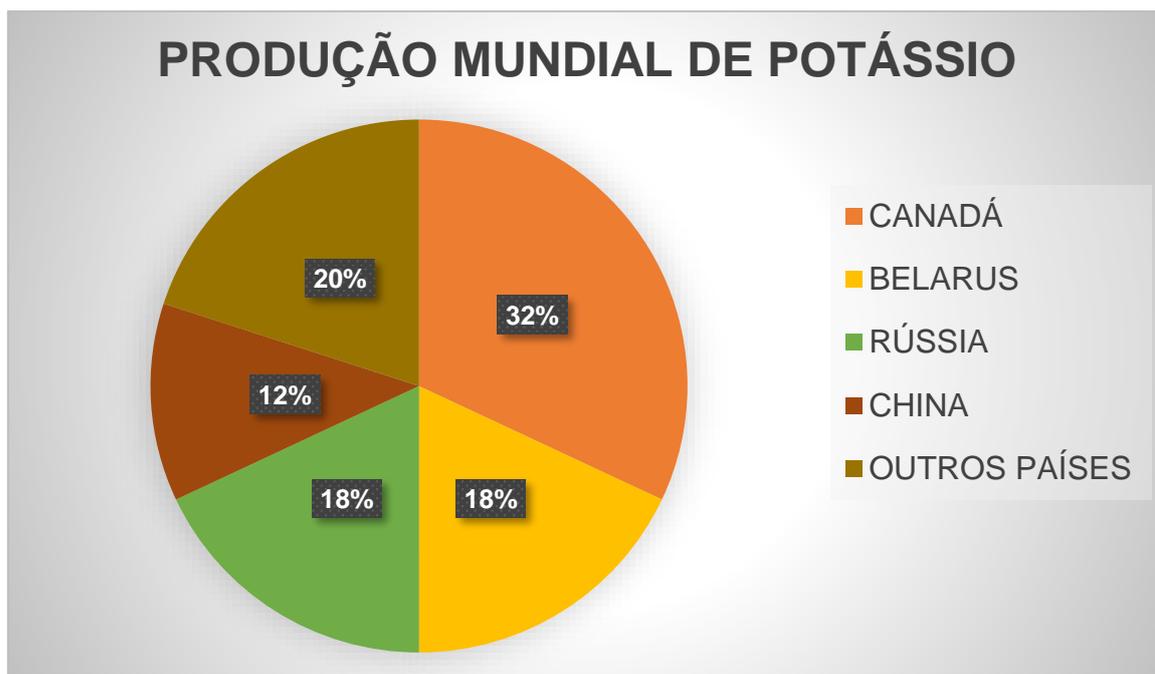


Figura 2. Produção mundial de potássio. Fonte: Elaborado a partir de dados disponíveis em OSAKI (2022).

De acordo com dados do Ministério da Economia (2020), o Brasil ocupa a posição de maior importador de K, tendo importado cerca de 10,45 milhões de toneladas, em 2019, e cerca de 11,5 milhões de toneladas, em 2020. Os maiores exportadores atuais de K para o Brasil são Rússia e Bielorrússia (Figura 3).

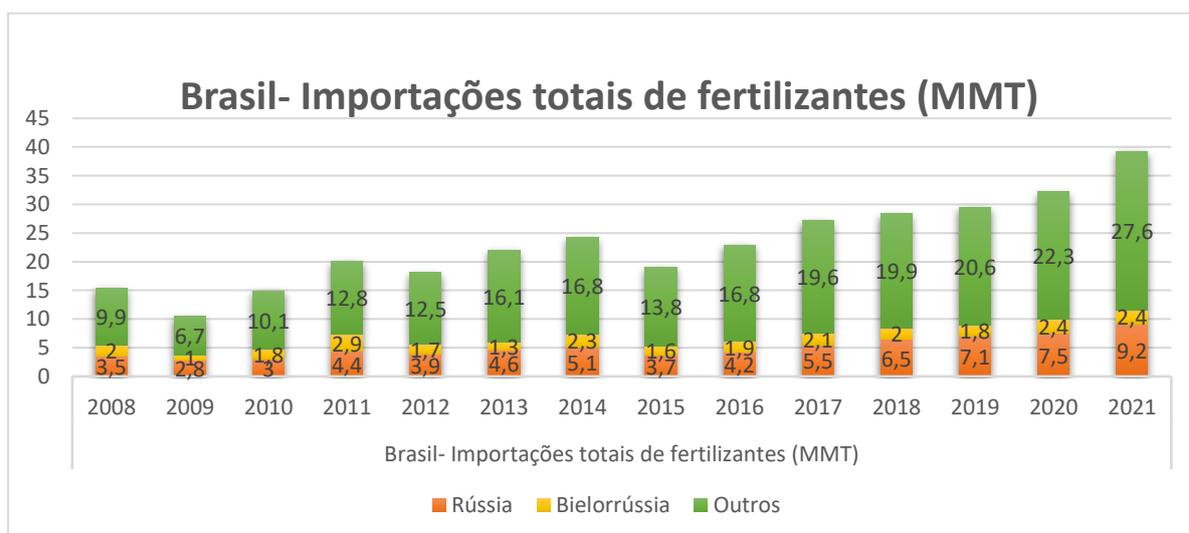


Figura 3. Importações totais de fertilizantes Fonte: Adaptado de AGROCONSULT (2022)

Em 2022 devido a guerra entre Ucrânia e a Rússia, principal fornecedora de fertilizantes do Brasil, houve uma grande instabilidade e incertezas frente o

fornecimento de fertilizantes para o Brasil. Em todos os cenários mundiais, o valor dos fertilizantes subiu cerca de 200% em 2022, com destaque para os valores do KCl, uma vez que Rússia e Bielorrússia são uns dos maiores produtores desse fertilizante (AGROBILL, 2022). No ano de 2021 o valor da tonelada de KCl era US\$ 300 já em abril de 2022 o valor da tonelada estava US\$ 1,1 mil (AGROBILL, 2022), aumento de 72%. Dessa forma, observou-se uma instabilidade no fornecimento de K no cenário mundial, principalmente no Brasil que é fortemente depende da importação de K.

O Brasil é um país que tem uma renda considerável gerada pelo agronegócio e a baixa oferta de K de outros fertilizantes pode afetar o agronegócio e conseqüentemente o PIB brasileiro (Produto Interno Bruto). Os altos preços dos fertilizantes e a baixa oferta limitou o uso de fertilizantes no ano 2022 além de despertar a necessidade de buscar alternativas para diminuir a dependência do Brasil frente a importação de fertilizantes. Em março de 2022 o decreto do Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) lançou a meta de reduzir as importações de fertilizantes para cerca de 50% até 2050 (INFOMONEY, 2022), além disso o PNF visa o estímulo à produção nacional, o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos na busca do aumento da eficiência do fertilizante. Sendo assim, há a necessidade de estudos que visam a produção de novos fertilizantes nacionais que minimizem as perdas de nutrientes e aumentem a eficiência do uso do fertilizante, como por exemplo os enriquecimentos de adubos orgânicos com fontes minerais.

2.3. Fertilizantes a base de biochar de lodo de esgoto enriquecidos com potássio

Sabe-se que cerca de 40% dos fertilizantes são desperdiçados no Brasil devido à falta de tecnologias de produção e utilização dos mesmos (SAE, 2020). Logo, torna-se evidente a necessidade do avanço nos estudos de novos fertilizantes e utilização mais eficaz dos já existentes.

O biochar é definido como um material abundante em carbono oriundo de biomassa carbonizada sob baixa atmosfera de oxigênio, o mesmo possui usos variáveis dependendo das suas características físico-químicas (NOBREGA, 2011). A biomassa usada para fazer o biochar e a temperatura a qual ela será submetida influencia diretamente na sua composição final e nas propriedades desse material (NOBREGA, 2011). De modo geral, o biochar pode contribuir para a melhoria dos

solos, promovendo aumento de estoque de carbono, rendimento maior em produção e uma boa capacidade de retenção hídrica (MAIA, 2010).

Mesmo com diversos benefícios para o solo e para as plantas ainda há dúvida quanto ao uso e eficácia do biochar de BLE para a agricultura. Em estudos recentes, tem sido comprovado que essa inovação é tanto economicamente viável como ambientalmente correta e benéfica para o meio ambiente (MARCELINO, 2020; JÚNIOR, 2022). No quesito de saúde pública a Resolução CONAMA 498 (Brasil, 2020) estabelece os critérios para o uso agrícola de LE, informando que o tratamento correto permite o uso para a agricultura de forma segura, além disso promove o reaproveitamento desse resíduo que possui poucas alternativas para destinos finais.

Após diferentes estudos, em diferentes temperaturas e regiões constatou-se a eficácia do BLE em fornecer nutrientes (NEVES et al., 2015), reter carbono (VACCARI et al., 2011), diminuir as perdas de nutrientes no solo (HOSSAIN et al., 2010), corrigir pH, auxiliar na estrutura do solo, ajudar na retenção hídrica (HERATH et al., 2013), além de efeitos benéficos ao meio ambiente ao longo do tempo (CHAGAS, 2018).

O uso do BLE como fertilizante orgânico ou organomineral comprovou ser capaz de auxiliar no cultivo de diversas culturas como grão de bico, tomate cereja, milho e alface. No grão de bico a eficiência agronômica foi superior quando comparados com fertilizante mineral, NPK. (VIANA, 2022). O aumento da produção de mais de 60% no tomate cereja também foi observado após utilização de BLE (HOSSAIN et al., 2010). Além disso, o BLE também foi utilizado na cultura do milho como fonte de P e supriu a cultura com o auxílio de aplicações de N e K (KEHERWALD, 2021) e na alface as diferentes doses de BLE aplicadas (10 t ha⁻¹, 20 t ha⁻¹ e 30 t ha⁻¹) aumentou a produtividade e a eficiência no uso de água (LIMA et al., 2020).

O BLE apresenta grande potencial para melhorar e manter a fertilidade do solo, pois fornece dois dos principais nutrientes demandados pela planta (N e P) (FERRER et al., 2011). Contudo, os macronutrientes mais aplicados para as plantas em seu desenvolvimento são N, P e K (GAZZONI, 2017). Dessa forma, o uso do BLE só tem restrições de suprir o K dependendo da cultura e suas exigências.

Portanto, o BLE pode ser usado como fertilizante e tem um alto potencial (SANTANA, 2019), porém possui pouca concentração de K (KIRCHMANN et al., 2016), ou seja, mesmo com o processo de pirólise que aumenta o teor de K, quando aplicado para fornecer nutrientes é preciso realizar uma complementação com K para

que a cultura se desenvolva (FACHINI et al., 2021a) caso contrário seria necessária uma dose muito alta de BLE, podendo se tornar inviável ou prejudicar as plantas (NEVES, 2015). Com isso, uma alternativa eficaz seria torná-lo um fertilizante organomineral, enriquecendo-o com K, no qual proporciona um fertilizante completo e auxilia na liberação de K de forma gradativa.

Alguns estudos já realizados com o enriquecimento de biochar, mostram que esta é uma alternativa com grande potencial para obter um fertilizante mais completo e equilibrado para o fornecimento de nutrientes para as plantas, podendo ser mais eficiente até mesmo dos fertilizantes minerais e orgânicos quanto aplicados isoladamente (FARRAR et al., 2018). Um estudo realizado sobre o enriquecimento de BLE com K resultou em um aumento no teor de K_2O em até 75 vezes quando comparado com o BLE puro (FACHINI, 2021b).

Os fertilizantes de biochar enriquecidos com fontes potássicas têm grande potencial agrícola, além disso quando submetidos a tecnologias após o enriquecimento como granulação e peletização dão origem a um produto mais homogêneo e de maior facilidade de aplicação no campo (FACHINI, 2021b). Além disso, os processos como granulação e peletização são formas de minimizar esses problemas relatados, ademais permitem uma melhor aplicação (FACHINI et al., 2021a).

Além de aumentar o fornecimento de K após o enriquecimento do BLE com fontes potássicas, o enriquecimento resulta em um fertilizante de liberação lenta (FACHINI et al., 2022) devido as características do BLE como à presença de cargas negativas na superfície do biochar que auxilia na retenção de potássio (GAO et al., 2016). Os mesmos autores comprovaram que fertilizantes a base de BLE enriquecidos com KCl, quando comparados com o fertilizante mineral KCl, reduziram a liberação de K em até 77% em areia de sílica. Diante disso, se vê os benefícios que essa tecnologia traz, como um fertilizante sustentável, completo, de liberação gradativa e de maior uniformidade e facilidade de aplicação ao campo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto

O biochar foi produzido a partir de amostras de LE coletadas na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Melchior, localizada em Samambaia, DF. O LE seco ao ar foi triturado e posteriormente submetido à temperatura de 300°C em forno de pirólise (Linn Elektro Therm, Eschenfelden, Alemanha), a uma taxa média de aumento de temperatura de 2,5°C min⁻¹, totalizando 120 minutos para atingir 300°C, e tempo de residência de 5 horas.

O BLE foi enriquecido com potássio, usando como fonte mineral o KCl. O BLE e o KCl foram triturados e, posteriormente, passados em peneiras com malha de 0,500 mm. Também foi utilizado na mistura o amido como agente aglutinador. A combinação de BLE+KCl+amido (BLE-K) foi submetida aos processos de peletização e granulação para obtenção de pellets e grânulos (Figura 4). A granulação e peletização foram feitas de acordo com a metodologia descrita em (FACHINI et al., 2021).

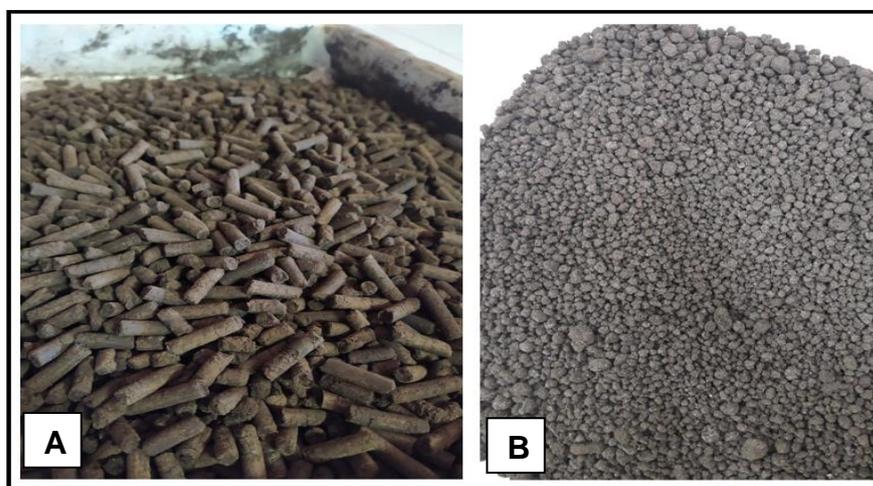


Figura 4. Fertilizantes de biochar enriquecidos com K na forma de pellet (A) e grânulo (B).

3.2. Condução do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Estudos da Matéria Orgânica do Solo (LabMOS) da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (FAV-UnB).

Para avaliar a dinâmica de liberação de K dos BLE-Ks, foi realizado o experimento de incubação conforme descrito em BLEY et al. (2017). Os fertilizantes

foram incubados em recipientes de 200 cm³ contendo amostras de dois tipos de solo (Figura 5), sendo um de textura argilosa (Latossolo Vermelho) e outro arenoso (Neossolo Regolítico), classificação anteriormente definida por SiBCS (2018). Esses solos foram coletados na Fazenda Água Limpa localizada no Núcleo Rural Vargem Bonita s/n - Núcleo Bandeirante, Brasília - DF, 71750-000. Tanto o Latossolo Vermelho quanto o Neossolo Regolítico foram coletados de áreas de cerrado nativo, cujas características químicas desses solos são apresentadas na Tabela 1.

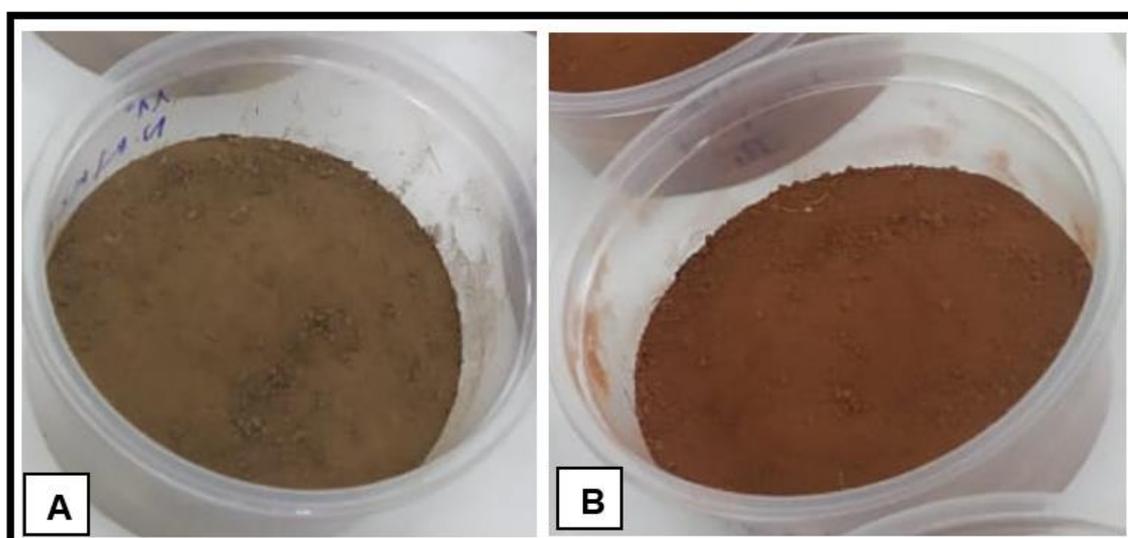


Figura 5. Solo de textura arenosa, Neossolo Regolítico (A), Solo de textura argilosa, Latossolo Vermelho (B).

Tabela 1. Características químicas e físicas dos solos estudados.

pH (CaCl₂)		5,2	5,8
Ca	cmol _d /dm ³	2,0	2,3
Mg	cmol _d /dm ³	0,8	0,7
Ca + Mg	cmol _d /dm ³	2,8	3,0
Al	cmol _d /dm ³	0,00	0,00
H + Al	cmol _d /dm ³	1,6	1,6
CTC	cmol _c /dm ³	4,47	4,69
P (Mehlich I)	mg/dm ³	1,0	1,0
K	cmol _d /dm ³	0,067	0,092
K	mg/dm ³	26	36
Mat. Org.	%	2,0	1,0

Mat. Org.	g/kg	20,0	10,0
Sat. Al (M%)	%	0	0
Sat. Base (V%)	%	64	66
Ca/Mg	-	2,5	3,3
Ca/CTC	%	44,4	48,9
Mg/CTC	%	17,8	14,9
(H+Al)/CTC	%	35,6	34
K/CTC	%	1,5	2,0
Argila	%	105,3	824,3
Areia	%	846,8	20,5
Silte	%	47,9	155,2

CTC: capacidade de troca de cátions. Adaptada de Costa (2017).

Antes de realizar as análises as amostras de solo foram secas ao ar e destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm, após isso foi feita a correção da acidez desse solo por meio de calagem. No ensaio de incubação, as amostras de solo foram acondicionadas em recipientes plásticos e em cada recipiente de incubação foram acrescentados 100 g de solo e 5 g de cada fertilizante enriquecido. Além dos BLE-Ks, também foi avaliado o fertilizante mineral KCl puro. Os fertilizantes enriquecidos com K foram analisados para obter dados sobre sua composição (Tabela 2).

Tabela 2. Concentração de macronutrientes em organominerais de BLE enriquecidos com K

Forma	Fonte				
	BLE + KCl		BLE + K ₂ SO ₄		
	Ca (g kg ⁻¹)				
Grânulo	5,5	b B		6,2	ab A
Pellet	5,5	b A		5,8	b A
Pó	7,0	a A		6,6	a A
Fonte	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	K ₂ O (g kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (%)	Soma NPK
BLE + KCl	14,5	1,3 b	3,0	5,3	11,3
BLE + K ₂ SO ₄	14,1	2,2 a	3,0	5,2	11,6
Forma					
Grânulo	13,8 b	1,6 c	3,0	5,1 b	11,2
Pellet	14,2 b	1,7 b	3,0	5,1 b	11,4
Pó	15,0 a	1,9 a	3,0	5,4 a	11,7

Médias seguidas por letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não apresentam diferenças estatísticas de acordo com o teste de Tukey (P<0,05). Adaptada de Fachini (2022).

Com base na concentração de K dos BLE-Ks (3%), 5 g de cada material foram utilizados para fornecer 1500 mg kg^{-1} de K_2O , o que corresponde à 1245 mg kg^{-1} de K. Os BLE-Ks e o fertilizante mineral KCl foram colocados em sachês de malha permeável de poliéster medindo $5 \times 4 \text{ cm}$ e selados nas extremidades com linha 100% de poliéster (Figura 6).

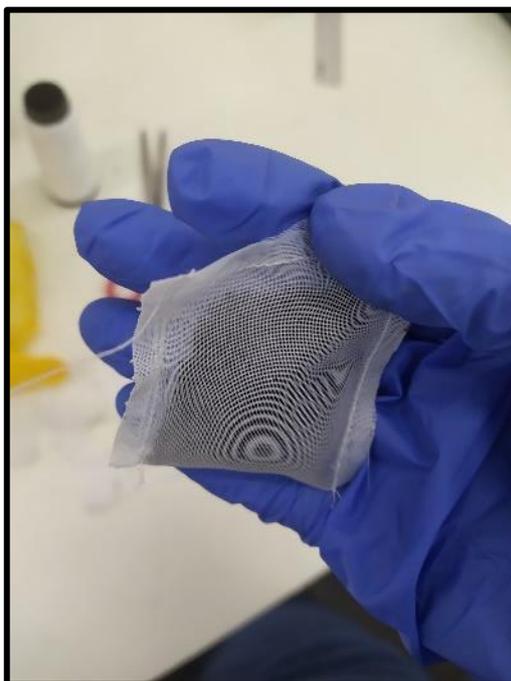


Figura 6. Sachê selado contendo 5 g de fertilizante.

Os sachês contendo os fertilizantes foram cuidadosamente inseridos no meio da massa de solo de cada recipiente. Inicialmente foram inseridos 40 g de amostra de solo, em seguida, colocados os sachês de fertilizantes e, por fim, cobertos com mais 60 g de amostra solo para completar a massa total de 100g (Figura 7).



Figura 7. Sequência mostrando os fertilizantes em sachês, pesagem das amostras de solo e montagem das unidades de incubação.

A massa total de solo foi umedecida com água destilada, para alcançar o teor de água na capacidade de campo correspondendo a 15% ($0,15 \text{ g g}^{-1}$) no solo arenoso e 33% ($0,33 \text{ g g}^{-1}$) no argiloso. Esses teores foram determinados pelo método de placas porosas de Richards. A umidade foi monitorada a cada 5 dias pela medição da massa total dos frascos utilizando uma balança de precisão. Quando necessário, foi aplicada água para manter os teores de água iniciais de cada solo (Figura 8).



Figura 8. Aplicação de água para manter os teores de água iniciais de cada solo.

3.3. Análises laboratoriais

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com três repetições em cada tipo de solo. Foram avaliados os seguintes tratamentos: 1) controle: apenas o solo sem adição de fertilizante; 2) organomineral BLE enriquecido com KCl granulado; 3) organomineral de BLE enriquecido com KCl peletizado; 4) fertilizante mineral KCl em pó. Foram avaliados 8 tratamentos (4 fertilizantes x 2 tipos de solo), com 3 repetições e 9 períodos de incubação, totalizando 216 amostras.

Os frascos contendo solo e os sachês com os fertilizantes foram incubados em sala de incubação com temperatura média de 25°C , pelos seguintes períodos: 12 horas, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 e 30 dias após o início da incubação (Figura 9).



Figura 9. Frascos contendo amostras dos solos estudados durante o período de incubação

Decorrido o período de incubação estabelecido para cada tratamento, os frascos foram retirados da incubadora separando-se o sachê do solo, colocando esse solo para secar e o destorroando (Figura 10).



Figura 10. Solo seco ao ar e destorroado.

Para a determinação do K liberado, o K foi extraído pela solução extratora Mehlich-1 conforme descrito por TEIXEIRA et al. (2017). Uma amostra 10 g de solo foi adicionada em 100 ml de solução extratora (Mehlich 1) (Figura 11). Em seguida, os recipientes foram agitados em mesa agitadora a 190 rpm e colocados para decantar por uma noite. No dia seguinte, foram pipetados 20 ml do extrato em um pequeno frasco e com o auxílio de um fotômetro de chama foram determinados os teores de K liberados na massa de solo (Figura 12).



Figura 11. Pesagem de amostras e solo com a solução extratora Mehlich 1.

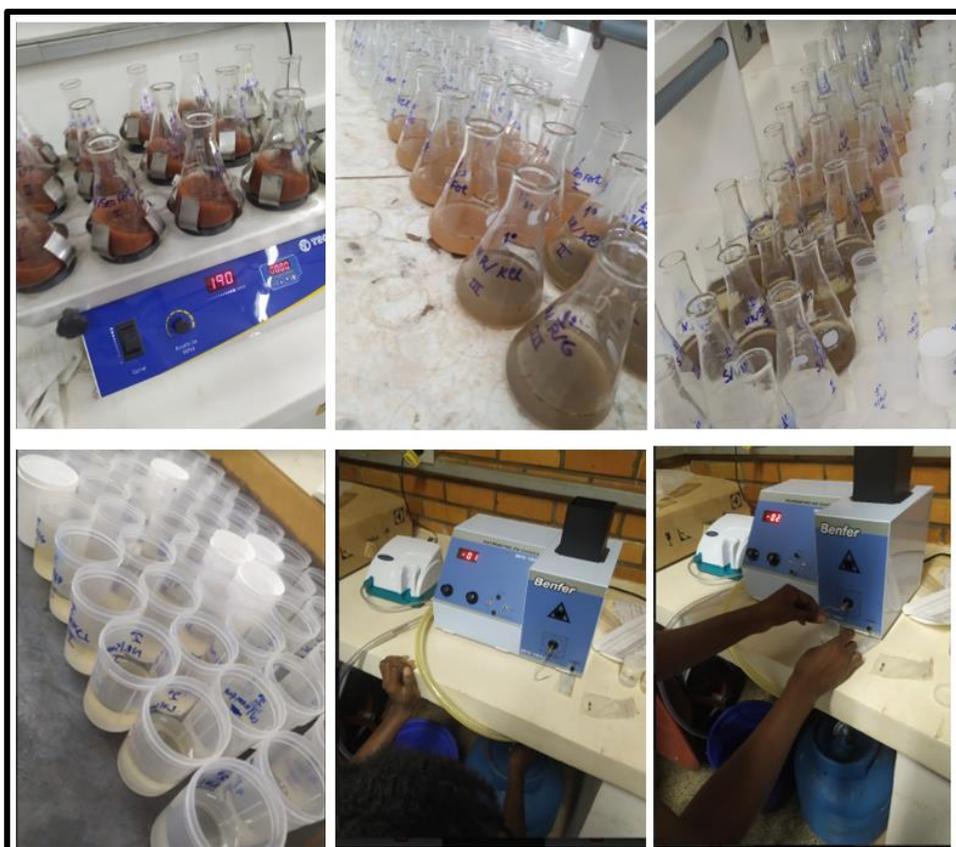


Figura 12. Sequência de tarefas para a leitura de teores de K das amostras de solo.

3.4. Análise estatística

Após a determinação do K por meio do fotômetro a taxa de liberação desse nutriente durante o período de incubação foi calculada conforme a equação:

$$\text{Liberação de K(\%)} = \left(\frac{K_t}{K_{t0}} \right) \times 100$$

onde, K_t = teor de K liberado no período de incubação (mg kg^{-1}); K_{t0} = teor total inicial do K (mg kg^{-1}) adicionado no sachê.

Em seguida, a dinâmica de liberação de potássio ao longo do tempo foi avaliada por meio de cinéticas de primeira ordem (regressões não lineares) com base na equação $K = a (1 - b^t)$. Os modelos foram testados quanto à significância estatística e os coeficientes (R^2) foram ajustados considerando os níveis de convergência (status) para cada modelo. As análises foram realizadas por meio do *software* XLSTAT 2013 (ADDINSOFT, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Mecanismo de liberação lenta de K

No presente estudo foi observada a influência da forma física (grânulo e pellets) dos fertilizantes enriquecidos na liberação de K em dois tipos diferentes de solo e sua atuação como fertilizante de liberação lenta. O grânulo e o pellet apresentaram uma liberação de K bem mais lenta do que o KCl, comprovando que os fertilizantes à base de biochar podem funcionar como fertilizantes de liberação lenta de K (Figura 13).

Essa característica de liberação lenta de K é promissora e busca aumentar a eficiência de uso do K e, conseqüentemente, reduzir o uso de fertilizantes solúveis de K. Nesse sentido, quando se pesquisa o fertilizante de liberação lenta a solubilidade é de grande importância, pois essa característica indica a quantidade dissolvida de um fertilizante na água, numa dada temperatura (AGROLINK, 2022). Diante disso, quanto maior for a solubilidade, mais rápida será a liberação dos nutrientes, logo a eficiência do fertilizante será menor quando o mesmo for de alta solubilidade (AGROLINK, 2022).

O fertilizante considerado de liberação lenta, libera os nutrientes de forma gradativa, atrasando a sua disponibilidade de absorção, sincronizando com as necessidades da cultura, além de melhorar o rendimento da planta devido a redução da perda de nutrientes (PICHELLI, 2018).

De acordo com o Comitê Europeu de Normalização (CEN), o fertilizante para ser considerado de liberação lenta é necessário cumprir três critérios: 1) não liberar mais de 15% do nutriente em 24 horas; 2) não liberar mais que 75% em 28 dias; 3) e liberar no mínimo 75% no prazo fixado pelo fabricante (TRENKEL, 2010). Diante

disso, no presente estudo, nota-se que o BLE-K, tanto no formato de grânulo quanto de pellet, atendeu esses critérios em ambos tipos de solo. Por outro lado, o fertilizante mineral KCl liberou cerca de 90% do K nas primeiras 24 h, estando sujeito a lixiviação.

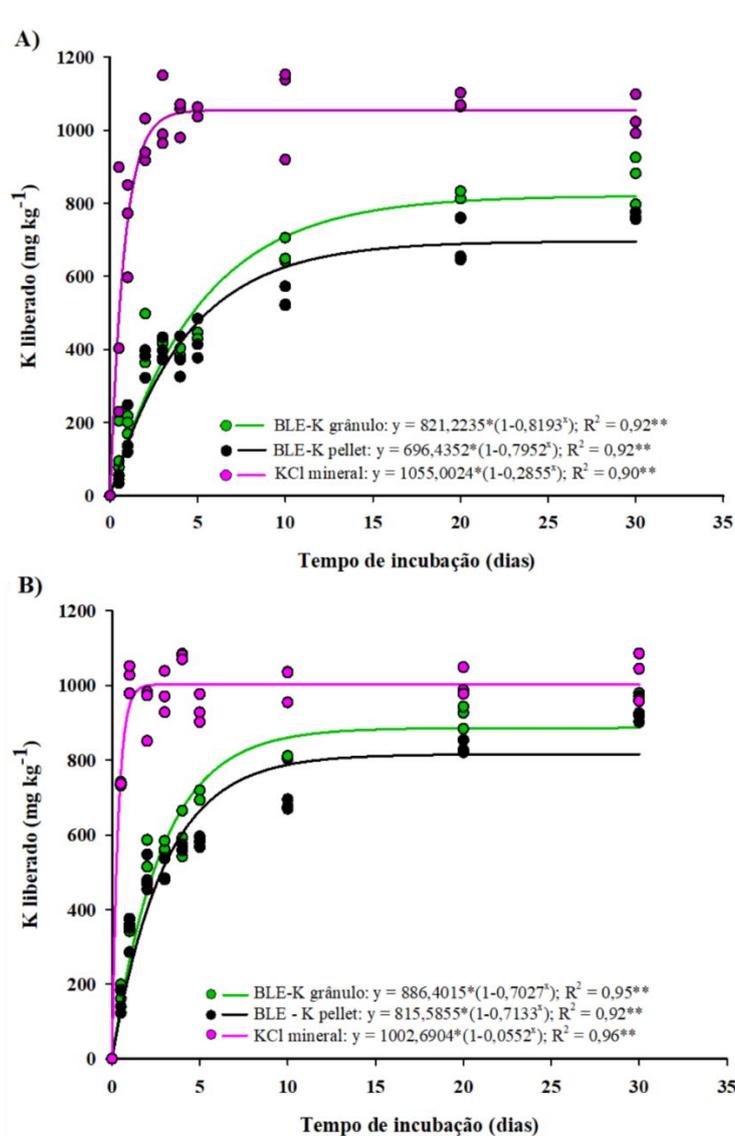


Figura 13 – Cinética de liberação de K de fertilizantes de BLE enriquecido com K na forma de grânulo e pellet, em diferentes solos: A) Solo arenoso. B) Solo argiloso. ** significativo a 5% ($P < 0,05$).

Alguns estudos com biochars enriquecidos buscam também a liberação gradativa, como realizado por Jassal et al. (2015) que propõe o enriquecimento de N de biochar de fontes inorgânicas e orgânicas de resíduos de N, trazendo benefícios ambientais e econômicos devido a liberação gradativa. Nesse trabalho foi observado a liberação de N em biochar feito em temperaturas de pirólise de 400, 500 e 600 °C de três matérias-primas: cama de frango, lascas de madeira macia de abeto-pinheiro

e uma mistura 50:50 de cama de frango e lascas de madeira macia de abeto-pinheiro. Os resultados apresentados foram que o biochar pode ser uma boa opção de mitigação para reduzir a lixiviação de N e as perdas gasosas através de sua liberação lenta. Outros trabalhos realizados com fertilizantes à base de biochar tiveram resultados similares ao do presente estudo como o de Carneiro et al. (2021). Nele os fertilizantes à base de biochar foram produzidos a partir de cama de frango e casca de café enriquecidos com ácido fosfórico e óxido de magnésio, em combinação com superfosfato triplo mostrou que a liberação de P foi mais lenta quando comparado com a aplicação apenas do superfosfato triplo. No estudo cinético do experimento superfosfato triplo liberou aproximadamente 90% do P total e o biochar enriquecido menos de 10% na primeira hora.

Essa liberação gradativa representada em gráfico (figura 13) é justificada pela forma física do fertilizante e as características químicas do BLE-K. As superfícies dos biochars são caracterizadas principalmente cargas negativas, que podem auxiliar uma maior sorção de cátions, como o K (MUKHERJEE et al., 2011). Isso implica a uma retenção maior desse nutriente quando o BLE-K é aplicado. Além disso, os processos de peletização e granulação também reduzem a liberação de K (KIM et al., 2014; FACHINI et al., 2022), devido a ação das partículas entre si forçando umas sobre as outras durante o processo, ocorre a redução do volume de poros e aumento da densidade (REZA et al., 2014).

4.2. Influência da tecnologia de granulação e peletização na liberação de K

Os fertilizantes podem ser aplicados ao solo de diferentes formas físicas, em pellet, grânulo, farelo ou pó. Entretanto, a forma física afeta a solubilidade do fertilizante, quanto menor o fertilizante, mais rápida é a liberação dos nutrientes (AGROLINK, 2022). No caso do biochar in natura, a presença de pequenas partículas na forma de pó dificulta o seu manejo no campo, no transporte e até no armazenamento, além de causar danos à saúde do aplicador devido à inalação direta do biochar (SANTOS JÚNIOR, 2022). Sendo assim, a granulação e a peletização são alternativas para transformar o BLE em um fertilizante mais homogêneo e de maior facilidade de aplicação ao campo. No entanto, grânulos e pellets apresentam morfologia e características físicas distintas e que influenciam na cinética de liberação de K (FACHINI et al., 2021b).

No presente estudo, o fertilizante KCl teve uma liberação muito rápida de K ao longo do tempo. Cerca de 90% do K aplicado foi liberado nas primeiras 24 horas após a aplicação do fertilizante. Esse comportamento é típico dos fertilizantes minerais de alta solubilidade, deixando o K, portanto, sujeito a perdas por lixiviação (AGROLINK, 2022). Isso já foi verificado em trabalho prévio, quando o KCl foi aplicado em areia de sílica pura (FACHINI et al., 2022). Já o grânulo e o pellet apresentaram uma liberação mais lenta do que o KCl, liberando cerca de apenas 15% ou até menos em 24h, comprovando que os fertilizantes à base de biochar podem funcionar como um fertilizante de liberação lenta de K.

Entre os fertilizantes à base de biochar houve uma diferença de 3% na liberação do nutriente. O pellet teve uma liberação de K mais lenta do que o grânulo, demonstrando que, quando aplicado na forma de pellet, o K estará disponível para as plantas durante um maior período do ciclo cultural, além de evitar perdas por lixiviação desse nutriente.

O processo de peletização é uma compactação de resíduos de biomassa por meio de força mecânica e tem como resultado um material sólido e uniforme (SANTOS JÚNIOR, 2022). Esse processo de compactação reduz a porosidade e proporciona uma liberação de nutrientes mais gradativa (SANTOS JÚNIOR, 2022). A liberação mais lenta do K oriundo do pellet é decorrente de dois fatores o efeito da adsorção de K na superfície do biochar e a compactação do pellet durante a peletização que reduz a porosidade dificultando a entrada de água no interior do pellet para promover a dissolução do fertilizante mineral que se encontra no interior do fertilizante (FACHINI et al., 2022).

4.3. Liberação do fertilizante em diferentes tipos de solos

Em ambos os tipos de solo a liberação de K se comportou de forma semelhante, dessa forma, a textura do solo não influenciou de forma significativa a liberação de K dos fertilizantes. Apesar de apresentarem texturas diferentes, os solos apresentam capacidade de troca de cátions (CTC) semelhantes. Isso parece ter sido o fator mais importante para explicar o comportamento semelhante dos dois solos na liberação de potássio.

A CTC do solo corresponde a quantidade total de cátions retidos à superfície dos minerais e matéria orgânica do solo em condição permutável ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H} + \text{Al}^{3+}$). A CTC dos solos pode variar em função de vários fatores, como do teor de

matéria orgânica, do tipo e da quantidade de argila e do pH do solo (RONQUIM, 2010). Quando se trata de K, a disponibilidade e a capacidade de suprimento do mesmo no solo dependem da presença de minerais primários e secundários, da aplicação de fertilizantes, da ciclagem do nutriente pelas plantas e principalmente da CTC do solo (WERLE et al., 2008). Essa propriedade permite que os solos possuam uma maior capacidade de reter temporariamente nutrientes com cargas positivas, como o K. Logo, com o valor da CTC semelhante nos solos, conclui-se que a liberação de um determinado nutriente ocorre de forma similar (WERLE et al., 2008).

A liberação de K em diferentes texturas obtida em diferentes estudos ocorreu de forma similar à do presente estudo, em que a textura não influenciou significativamente na liberação do nutriente (ROSOLEM et al., 1993). Em estudo com aplicação de biochar em solos com textura argilosa e arenosa, apesar de ter sido verificado alteração nas propriedades químicas de cada solo, não houve diferença entre solos avaliados (CHAVES; MENDES, 2016).

Entretanto, quanto maior a CTC do solo maior a capacidade de reter temporariamente K (POTAFOS, 1998). Essa característica do solo também pode ser aumentada por meio da adição de matéria orgânica e aumento de pH no solo. Estudos realizados após aplicações de biochars derivados de matérias primas diferentes mostram aumentos de pH, CTC, teor de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes (YUAN et al., 2016; ALVARENGA et al., 2016; KLEEMANN et al., 2017). Além disso, quando o solo foi tratado com adição de BLE a CTC aumentou em até 40% e o pH em uma unidade (MIKAN & ABRAMS, 1995). Em outro estudo também foi constatado que o BLE foi capaz de aumentar os indicadores de fertilidade do solo como a saturação de bases e CTC além de fornecer nutrientes em um curto período para rabanetes (SOUSA; FIGUEIREDO, 2016).

Quando se trata da relação entre a textura do solo e liberação de nutrientes podemos dizer que nesse presente estudo não houve diferenças significativa, mas alguns estudos mostram que a textura ou tipo de solo pode influenciar na liberação de nutrientes. Em um estudo de Werle et al. (2008) foram obtidos resultados da incubação mostraram que o tipo de solo afeta a dinâmica do N no solo após a adição de adubos orgânicos. No solo argiloso a textura retardou a imobilização e a nitrificação do amônio assim, diminuindo o potencial poluente do N, já no solo arenoso a mineralização líquida do N foi maior devido à menor proteção físico-química da sua fração coloidal.

Contudo, o BLE-K é uma alternativa que busca o reaproveitamento de resíduos, a redução de impactos ambientais causados pelas aplicações de fertilizantes, é uma nova opção de organomineral que traz diversos benefícios ao solo e planta. Ademais, pode ajudar no melhor aproveitamento de fertilizantes assim podendo até reduzir a dependência brasileira de importações. É evidente que esse fertilizante pode contribuir bastante para o setor agrícola e após essas análises de liberação de K, análises da influência da forma física e também de texturas de solos, podemos compreender melhor o funcionamento desse fertilizante analisando seus pontos fortes e fracos. Além disso, é necessário realizar complementos a esse estudo como a avaliação da lixiviação desses solos, e realizar estudos com maior número de solos contrastantes.

5. CONCLUSÕES

Os fertilizantes à base de biochar liberaram K de forma gradativa, funcionando como fertilizantes de liberação lenta apresentando-se como promissora opção para melhor aproveitamento e eficiência do K aplicado nos cultivos. Os fertilizantes na forma de pellet foram aqueles que promoveram a menor liberação de K ao longo de 30 dias de estudo. Além disso, o comportamento de liberação de K dos fertilizantes à base de biochar não foi afetado pela textura do solo. Estudos com maior número de solos contrastantes são necessários para confirmação dos resultados em diferentes condições

6. REFERÊNCIAS

ADDINSOFT, **XLSTAT 2013**: Statistical software for Microsoft Excel, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM), **Sumário Mineral 2017**, v. 37., p. 144-146, 2022.

AGROCONSULT, 2022. Disponível em: <<https://agroconsult.com.br/#informacoes-e-analises>> Acesso em 20 de jan. de 2023.

AGROLINK, Nanofertilizantes. **Agrolink**, 2021. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/adubacao-mineral/fertilizantes-de-liberacao-controlada_455166.html> Acesso em: 27 de jan. de 2023.

AGROLINK, Nanofertilizantes. **Agrolink**, 2022. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/aspectos-gerais/caracteristicas-dos-fertilizantes_460565.html> Acesso em: 27 de jan. de 2023.

ALVARENGA, P.; FARTO, M.; MOURINHA, C.; PALMA, P. Beneficial use of dewatered and composted sewage sludge as soil amendments: behavior of metals in soil and their uptake by plants. **Waste Biomass Valor**, v. 7, p. 1189 – 1201, 2016.

ALVES, B. S. Q.; ZELAYA, K. P. S.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; NAPOLI, A.; PARIKH, S. J.; FERNANDES, L. A. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, v. 31, n.4,2021.

ALVES, M. Neossolo é solo que destaca diferentes tipos e características variáveis. **Agro 2.0**, 2019. Disponível em: <<https://agro20.com.br/neossolo/>>Neossolo é solo que destaca diferentes tipos e características variáveis Acesso em 24 de jan. de 2023.

ANGIN, D. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. **Bioresource Technology**, v. 128, p. 593-597, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (Brasil). **Principais indicadores do setor de fertilizantes: janeiro de 2021**. São Paulo: Anda, 2021. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2021/06/Principais_Indicadores_2021.pdf> Acesso em: 20 de jan. de 2023

BENATO, F. R., Conteúdo Técnico: Quais as funções do potássio nas plantas? Canal Agro, **BIOSUL**, 2020. Disponível em:<<https://www.biosul.com/noticia/quais-as-funcoes-do-potassio-nas-plantas>>. Acesso em: 04 de jan. de 2023.

BERNARDI, A.C.C.; MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C.M.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. Uso agrícola dos solos brasileiros. Embrapa Solos, Rio de Janeiro p. 61-77, 2002.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. DE (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA MEIO AMBIENTE, p. 25–35, 2006.

BIDWEL, R.G.S. Plant physiology. Nova Iorque: **MacMillan**, 643 p., 1974.

BITTENCOURT, M. Entenda a crise dos fertilizantes e a falta de potássio **AGROBILL**, 2022. Disponível em:<<https://www.agrobill.com.br/blog/entenda-a-crise-dos-fertilizantes-e-a-falta-de-potassio/>> Acesso em: 16 de dez. de 2022

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, nº 167, Seção 1, p. 141-146, 2006.

BRASIL. SECRETARIA ESPECIAL DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS (SAE), **Produção nacional de fertilizantes: Estudo estratégico**, v. 10, 1-26, 2020.

BOLETIM LOGÍSTICO. Brasília, DF: Conab, ano VI, dez. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/boletim-logistico>> Acesso em: 20 de jan. de 2023.

CARNEIRO, J. S. S.; RIBEIRO, I. C. A.; NARDIS, B. O.; BARBOSA, C. F.; FILHO, J. F. L.; MELO, L. C. A. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of The Total Environment**, v. 760, 2021.

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

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

CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S. Interpretation of the chemical characteristics of soils submitted to incubation with biochar and MB-4 rock powder. **Revista Espacios**, vol. 37, n. 30, 18 p., 2016.

CHENG, H.; JONES, D.L.; HILL, P.; BASTAMI, M.S.; TU, C.L. Influence of biochar produced from different pyrolysis temperature on nutrient retention and leaching. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, p. 850-859, 2017.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB. **Sistemas de Esgotamento**. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/normas-e-regulamentacoes/3-portal/esgoto.html>> Acesso em: 06 de jan. de 2023.

Crise dos fertilizantes faz crescer interesse por potássio nacional, **INFOMONEY**, 2022. Disponível em: <<https://www.infomoney.com.br/mercados/crise-dos-fertilizantes-faz-crescer-interesse-por-potassio-nacional/>> Acesso em: 16 de dez. de 2022.

CURCIO, G. R.; BONNET, A.; KACHAROUSKI, M. Neossolos litólicos do subplanalto de Cascavel – **Características e potencial de uso**, 2020. Disponível em: <

DONG, D., WANG, C., VAN ZWIETEN, L. et al. Um fertilizante de liberação lenta baseado em biocarvão eficaz para reduzir a perda de nitrogênio em arrozais. **J Soils Sediments**, v. 20, p. 3027–3040, 2020.

DU, C., ZHOU, J., SHAVIV, A. Release Characteristics of Nutrients from Polymer-coated Compound Controlled Release Fertilizers. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 14, p. 223–230, 2006.

ELTINK, B. J. & PEREIRA, M., Dinâmica do Potássio no Sistema Solo – Planta – Ambiente, **AGROMOVE**, 2022. Disponível em:<
<https://blog.agromove.com.br/potassio-solo-planta-ambiente/> >. Acesso em: 13 de jan. de 2023.

FACHINI, J.; COSER, T.R.; ARAUJO, A.S.D.; VALE, A.T.D.; JINDO, K.; FIGUEIREDO, C.C.D. One Year Residual Effect of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment for Maize in a Brazilian Oxisol. **Sustainability**, v.13, n.2226, 14 p., 2021a.

FACHINI, J.; FIGUEIREDO C. C. DE; FRAZÃO, J. J.; ROSA, S. D.; SILVA, J.; VALE, A. T. Novel K-enriched organomineral fertilizer from sewage sludge-biochar: Chemical, physical and mineralogical characterization. **Waste Management**, v. 135, p. 98-108, 2021b.

FACHINI, J.; FIGUEIREDO C. C. DE; VALE, A. T. Assessing potassium release in natural silica sand from novel K-enriched sewage sludge biochar fertilizers, **Journal of Environmental Management**, v. 314, 9 p., 2022.

FARIA, W.M.; FIGUEIREDO, C.C.DE; COSER, T.R.; VALE, A.T.; SCHNEIDER, B.G. Is sewage biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two – year field experiment. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, p. 505 – 519, 2018.

FARRAR, M. B.; WALLACE H. M.; XU, C. Y.; NGUYEN, N. T. T.; TAVAKKOLI, E.; JOSEPH, S.; BAI, S. H. Short-term effects of organo-mineral enriched biochar fertiliser on ginger yield and nutrient cycling. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, p. 668 – 682, 2018.

FERREIRA, A. L. Lodo de esgoto é ótimo adubo para reflorestamento. **EMBRAPA Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação**, Embrapa Agrobiologia, 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/44370852/lodo-de-esgoto-e-otimo-adubo-para-reflorestamento>> Acesso em: 13 de jan. de 2023

FERRER, A.; OÑA, J.; OSORIO, F.; MOCHÓN, I. Evolution of the soil and vegetation cover on road embankments after the application of sewage sludge. **Water and Air Soil Pollution**, v. 214, p. 231–240, 2011.

FREDDI, L. A. Riscos associados à aplicação do lodo de esgoto na agricultura. Revista Científica ANAP Brasil, v. 12, n. 24, 2019.

GAO, S.; HOFFMAN-KRULL, K.; BIDWELL, A.L.; DELUCA, T.H. Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 233, p.43-54, 2016.

GAZZONI, D. L. Os minerais têm atividades específicas na vida das plantas, e a falta de um prejudica o todo, ANPII, 2017. Disponível em: <<http://www.anpii.org.br/nutrientes-e-suas-funcoes-na-planta>>. Acesso em 06 de jan. de 2023.

Governo descobre novos depósitos de potássio para uso na agricultura, SERVIÇOS E INFORMAÇÕES DO BRASIL, 2021 Disponível em:<<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-mineraisecombustiveis/2021/01/governodescobrenovosdepositos-de-potassio-para-uso-na-agricultura>>. Acesso em: 04 de jan de 2023

GONÇALVES, K. Y. Análise da influência das variáveis de produção do biochar para adsorção de nutrientes. Dissertação de Mestrado Engenharia de Produção- Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta grossa, 101 p. 2021.

GWENZI, W.; MUZAVA, M.; MAPANDA, F.; TAURO, T.P. Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrientes on a tropical clay soil in Zimbabwe. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 15, p. 1395-1406, 2016.

HE, Y.D.; ZHAI, Y. B.; LI, C. T.; YANG, F.; CHEN, L.; FAN, X. P.; PENG, W. F. & FU, Z. M. The fate of Cu, Zn, Pb and Cd during the pyrolysis of sewage sludge at different temperatures. **Environmental Technology**, v. 31, n. 5, p.567-574, 2010.

HERATH, H. M. S. K.; ARBESTAIN, M. C.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. **Geoderma**, v. 209-210, p. 188-197, 2013.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; CHAN, K. Y.; ZIOLKOWSKI, A.; NELSON, P. F. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 233-228, 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Nota técnica, Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação, 2023. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2023.

INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO, Manual Internacional de Fertilidade do Solo. Tradução e adaptação de LOPES, A. S. 2 ed., 177 p., Piracicaba: POTAFOS, 1998.

JASSAL, R. S.; JOHNSON, M. S.; MOLODOVSKAYA, M.; BLACK, T. A.; JOLLYMORE, A.; SVEINSON, K. Nitrogen enrichment potential of biochar in relation to pyrolysis temperature and feedstock quality, **Journal of Environmental Management**. v. 152, p 140-144, 2015.

JAYARAMAN, K. & GOKALP, I. Thermogravimetric and evolved gas analyses of high ash Indian and Turkish coal pyrolysis and gasification. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 121, n. 2, p. 919-927, 2015.

JÚNIOR, C. D. C.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C.; PEREIRA, A. K. S.; JÚNIOR, A. F. D. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e futuras pesquisas **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, 2022.

KEHERWALD, G. U., Biochar de lodo de esgoto como fonte de fósforo para o milho: uma abordagem inicial, Monografia (Graduação – Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 44 p., 2021.

KINPARA, D. I. **A Importância estratégica do potássio para o Brasil**, Planaltina, DF: EMBRAPA CERRADOS, 1º ed. 27 p., 2003.

KIRCHMANN, H.; BÖRJESSON, G.; KÄTTERER T.; COHEN, Y. From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. **Ambio**, v. 46, p.143 – 154, 2016.

KLEEMANN, R.; CHENOWETH, J.; CLIFT, R.; MORSE S.; PEARCE, P.; SAROJ, D. Comparison of phosphorus recovery from incinerated sewage sludge ash (ISSA) and pyrolysed sewage sludge char (PSSC). **Waste Management**, v. 60, p. 201 – 210, 2017.

LEHMANN, J.; RILLING, M.C.; THIES J.; MASILLO, C.A.; HOCKADAY, W.C. CEOWLEY, D. Biochar effects on soil biota – A review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, p.1812 –1836, 2011.

LIMA, J. R. S. de; ARAÚJO, M. B. de; OLIVEIRA, C. L. de; BARROS ,C. T. ; AMORIM, A. S.; BEZERRA A. L.; DILL, P. R. J.; MEDEIROS, E. V. de; HAMMECKER, C.; ANTONINO, A. C. D.; , LEITE, M. C. B. S. Biochar de Lodo de Esgoto Aumenta a Produção e Eficiência no Uso de Água da Alface, **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.04, p. 1720-1729, 2020.

LIU, Z.; SINGER, S.; TONG, Y.; KIMBELL, L.; ANDERSON, E.; HUGHES, M.; ZITOMER, D.; MCNAMARA, P. Characteristics and applications of biochars derived from wastewater solids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 650–664, 2018.

MAIA, C. M. B. de F. II SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO FLORESTAL, XI SEMANA DE ESTUDOS FLORESTAIS. **Legislação florestal e o Código Florestal Brasileiro: anais**. Irati: UNICENTRO, 2010.

MARCELINO, I. P.; LOSS, A.; ANDRADE, M. A. N. Aspectos gerais do uso do biochar para sustentabilidade com ênfase aos atributos edáficos: a revisão. **Revista gestão e sustentabilidade ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp., p. 301-319, 2020.

MEYER, B. S.; ANDERSON, D. B.; BOHNING, R. H.; FRATIANNE D. C. Introduction to plant physiology. 2. Ed. Nova Iorque: **D. Van Nostrand**, 1973. 565 p.

MIKAN, C. J.; ABRAMS, M. D. Altered forest composition and soil properties of historic charcoal hearths in southeastern Pennsylvania. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 25, p. 687–696, 1995.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A.R.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. **Geoderma**, v. 163, p. 247-255, 2011.

NEVES, H. C. V.; SOUSA, A. A.T. C.; FIGUEIREDO, C. C. 2015, 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**, 4 p., 2015.

NÓBREGA, I. P. C. Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: - Sequestro de carbono no solo, Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 46 p., 2011.

OSAKI, M. Conflito no leste europeu completa um mês e setor de fertilizantes segue apreensivo. **CEPEA**, 2022. Disponível em: <[PAZ-FERREIRO, J.; NIETO, A.; MÉNDEZ, A.; ASKELAND, M.; GASCÓ, G. Biochar from biosolids pyrolysis: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.15, 956 p., 2018.](https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinia-o-cepea/conflito-no-leste-europeu-completa-um-mes-e-setor-de-fertilizantes-segue-apreensivo.aspx#:~:text=Por%20sua%20vez%2C%20apenas%20quatro,%2C7%25%2C%20de%20Belarus.> Acesso em: 20 de jan. de 2023.</p></div><div data-bbox=)

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., DE SOUSA, J. F., PICKLER, A. DE C., LEAL, E. R. M., & MILHOMEN, C. DA C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, n.16, p. 147–158, 2013

PICHELLI, K. **Pesquisa usa nanofibras de celulose para produzir fertilizante de liberação controlada**, Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, Planaltina, DF: EMBRAPA FLORESTAS, 2018. Disponível em:< [Potássio: Reservas, Mercado e Produção, **SAGA CONSULTORIA**, 2021. Disponível em: <<https://sagaconsultoria.com/potassio-reservas-mercado-e-producao/>> Acesso em: 04 de jan. de 2023.](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32371396/pesquisa-usa-nanofibras-de-celulose-para-produzir-fertilizante-de-liberacao-controlada#:~:text=de%20libera%C3%A7%C3%A3o%20lenta-,Fertilizantes%20de%20libera%C3%A7%C3%A3o%20lenta%20ou%20controlada%20liberam%20os%20nutrientes%20de,as%20necessidades%20nutricionais%20da%20planta.> Acesso em: 16 de jan. de 2023.</p></div><div data-bbox=)

REDAÇÃO MOSAIC, O que são fertilizantes e qual sua função? **Nutrição de Safras**, 2022. Disponível em: <<https://nutricaodesafras.com.br/fertilizantes>> Acesso em: 27 de jan. de 2023.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais, Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. **Embrapa**, 1 ed., 26 p., 2010.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. 2.ed., v. 35, p. 1806-3322 - Campinas: Embrapa Territorial, 2020.

SAITO, M. L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA MEIO AMBIENTE, 35 p., 2007.

SANTANA, I. L. de. Potencial de uso do lodo de esgoto e de seu biocarvão visando as propriedades físico-hídricas de um solo cultivado com café Conilon (*Coffea canephora*). São Cristóvão, SE, v. 72, 2019.

SANTOS, H. G., et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 5. ed. Brasília, DF :**Embrapa**, 2018. 356 p.

SANTOS, H. G.; ZARONI M. J. Latossolos vermelhos, **Embrapa**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelhos>> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

SANTOS, H. G.; ZARONI M. J. Neossolos, **Embrapa**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos> > Acesso em: 24 de jan. de 2023.

SANTOS JÚNIOR, J. M. Pellets de biochar como condicionador de solo na produção e nutrição de *urochlos brizanta cv. Brs paiaguás*, Dissertação de Mestrado em Área de concentração em produção vegetal-Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 59 p., 2022.

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

SOUSA, D. M. G. DE; LOBATO, E. Latossolos, **Embrapa**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/solo/tipos-de-solo/latossolos>> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

TEIXEIRA, P.C.; DOBAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. Manual de Métodos de Análise do Solo, 3 ed. Embrapa: Brasília, Brasil; 573 p., 2017.

TRENKEL, M.E. Slow and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: an Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture, **International Fertilizer Industry Association**, Paris, ed.2, 2010. Disponível em:

<https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2010_Trenkel_slow%20release%20book.pdf>. Acesso em: 16 de jan. de 2023.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; MELO, J. MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES, 2002. 468p

VACCARI, F. P.; BARONTI, E. L.; GENESIO, L.; CASTALDI, S.; FORNASIER, F. MIGLIETTA, F. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 34, p. 231-238, 2011.

VELOSO, C. Lixiviação de nutrientes: por que o potássio possui o maior risco de perdas? **BLOG VERDE**, 2023. Disponível em:<<https://blog.verde.ag/nutricao-de-plantas/lixiviacao-de-nutrientes-por-que-o-potassio-possui-o-maior-risco-de-perdas/>>. Acesso em: 13 de jan. de 2023.

VIANA, A. R. S., Produção de grão-de-bico adubado com fertilizantes organominerais de lodo de esgoto, Dissertação de mestrado, Area de concentração em produção vegetal, Universidade Federal de Minas Gerais/ Instituto de Ciências Agrárias, Minas Gerais, 76 p., 2022.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Potassium leaching as affected by soil texture and potassium availability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.2297-2305, 2008.

YARA BRASIL, Equipe Agronômica. De fatores limitantes às oportunidades: conheça o solo do Cerrado, **Yara Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/cerrado/#:~:text=Latossolos%20do%20Cerrado,na%20maior%20parte%20do%20ano.>> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

YUAN, H.; LU, T.; WANG, Y.; CHEN, Y., LEI, T. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. **Geoderma**, v. 267, p.17 – 23, 2016.

ZHAO, L.; SUN, Z.; PAN, X.; TAN, J.; YANG, S.; WU, J.; CHEN, C.; YUAN, Y.; REN, N. Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions. **Water Research**, v.18,2023.