

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

CURSO DE AGRONOMIA

HANNA GABRIELA DA COSTA

**Liberação de K a partir de Remineralizadores de Solo: Efeito de Solo, Acidez, Tempo e
Extratores**

UBERLÂNDIA-MG

2025

HANNA GABRIELA DA COSTA

Liberação de K a partir de Remineralizadores de Solo: Efeito de Solo, Acidez, Tempo e Extratores

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do título de bacharel em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Wedisson Oliveira Santos

UBERLÂNDIA-MG

2025

HANNA GABRIELA DA COSTA

Liberação de K a partir de Remineralizadores de Solo: Efeito de Solo, Acidez, Tempo e Extratores

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do título de bacharel em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Wedisson Oliveira Santos

Banca Examinadora:

Larissa Carmelina Alves Pinto- Eng. Agrônoma (UFU)

Araína Hulmann Batista- Doutora (ICIAG/UFU)

Wedisson Oliveira Santos – Doutor (ICIAG/UFU)

UBERLÂNDIA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, fonte suprema de sabedoria, força e inspiração, que me concedeu saúde, perseverança e clareza de pensamento ao longo de toda esta jornada acadêmica. Sem Sua presença constante e amparo divino, não teria sido possível superar os desafios e concluir este trabalho. Que este momento seja também uma demonstração de gratidão por todas as bênçãos recebidas e pelo dom da vida que me permite buscar conhecimento e crescimento.

Expresso minha mais profunda gratidão aos meus pais, Ana Cristina da Costa e Antônio Carlos da Costa, ao meu irmão Arthur Gabriel e ao meu querido companheiro Ryan Lucas, cuja presença constante, apoio incondicional e incentivo perseverante foram pilares fundamentais ao longo de minha trajetória acadêmica. O suporte afetivo e motivacional por eles ofertado foi imprescindível para a superação dos desafios e para a plena concretização deste projeto.

Registro também meus sinceros agradecimentos aos amigos Aparecida Jorge, Rafael Duarte, Vitória Maria e demais colegas de turma, cujo companheirismo e colaboração nas diversas atividades desenvolvidas enriqueceram minha formação e fortaleceram meu compromisso com o saber.

Manifesto meu reconhecimento ao professor orientador Wedisson Santos, cuja dedicação exemplar, estímulo constante à pesquisa científica e orientação atenta foram decisivos para a realização deste trabalho. Agradeço, ainda, aos técnicos do Laboratório de Análises de Solo e Tecido Vegetal (LABAS) da Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte técnico imprescindível e pela colaboração eficiente que contribuíram significativamente para o êxito desta pesquisa.

Agradeço a Rede de Laboratórios Multiusuário (RELAM/PROPP) da Universidade Federal de Uberlândia por fornecer o(s) equipamento(s) e suporte técnico para a realização dos experimentos.

Finalmente, sou grata à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo fomento concedido ao projeto **APQ-01968-23**, e pela valiosa oportunidade de Iniciação Científica, que possibilitou a concretização deste trabalho e o desenvolvimento de minha vocação científica.

RESUMO

A elevada dependência brasileira de importação de fertilizantes potássicos expõe a agricultura nacional a riscos geopolíticos e à volatilidade de preços desses insumos agrícolas, tornando essencial a prospecção de fontes alternativas de potássio (K) de ocorrência local. Nesse contexto, os remineralizadores de solo, obtidos a partir da moagem de rochas silicatadas, têm se destacado como potenciais fertilizantes potássicos. O presente trabalho objetivou caracterizar remineralizadores de solo quanto à composição mineralógica por DRX e MEV e avaliar a liberação de K por diferentes extratores considerando o esquema fatorial $7 \times 2 \times 2 \times 3$, sendo seis fontes de K, e tratamento controle (Verdete, Fonolito, Micaxisto, Kamafugito, Basalto, KCl e controle), dois solos de textura contrastante (argilosa e arenosa), duas condições de acidez ativa (pH 5 e pH 6,5) e três tempos de incubação (60, 120 e 180 d). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os teores de K foram quantificados pelos extratores Mehlich-1 e Acetato de Amônio. Os resultados evidenciaram que os remineralizadores apresentam ampla variabilidade mineralógica, como Glauconita, Quartzo e Muscovita, no Verdete; Muscovita, Anortita, Olivina, Caulinita e Micas no Micaxisto; Caulinita, Analcima e Fosterita no Kamafugito, Ortoclásio, Nefelina e Microclínio para o Fonolito, e Cubanita e Anortita no Basalto. O Fonolito e Micaxisto destacam-se como as fontes mais promissoras na liberação do nutriente. A liberação de K foi influenciada pelo tipo de solo, sendo maior em solo argiloso, independentemente da fonte utilizada, o que está associado ao maior efeito dreno e capacidade de tamponamento desse solo. O fator pH, na faixa estudada, não apresentou efeito isolado sobre a liberação do nutriente. Observou-se, ainda, que o tempo de incubação promoveu incremento progressivo da liberação de K, refletindo a baixa solubilidade dos minerais potássicos. Em relação aos extratores, o Acetato de Amônio acessou teores de K, em geral, mais elevados que o Mehlich-1, por possivelmente acessar formas não trocáveis do elemento. Entre os remineralizadores avaliados, verifica-se maior potencial para o Fonolito e o Micaxisto considerando apenas a liberação de K, entretanto estudos de campo são necessários para se avaliar a viabilidade financeira quanto ao uso agrícola desses materiais.

Palavras-chave: Fertilidade; nutriente; pó de rocha; DRX; MEV.

ABSTRACT

Brazil's strong dependence on the importation of potassic fertilizers exposes national agriculture to geopolitical risks and to the price volatility of these agricultural inputs, making the prospecting of alternative locally occurring potassium (K) sources essential. In this context, soil remineralizers, obtained from the grinding of silicate rocks, have emerged as potential potassium fertilizers. This study aimed to characterize soil remineralizers regarding their mineralogical composition by XRD and SEM and to evaluate K release measured by different extractants under a 7 x 2 x 2 x 3 factorial scheme, consisting of six K sources plus one control treatment (Verdete, Phonolite, Mica schist, Kamafugite, Basalt, KCl, and control), two soils with contrasting textures (clayey and sandy), two active acidity conditions (pH 5 and pH 6.5), and three incubation times (60, 120, and 180 d). Treatments were arranged in a randomized block design with three replications. K contents were quantified using Mehlich-1 and Ammonium Acetate extractants. Results showed that the remineralizers present wide mineralogical variability, such as Glauconite, Quartz, and Muscovite as the main minerals in Verdete; Muscovite, Anorthite, Olivine, Kaolinite, and Micas in Mica schist; Kaolinite, Analcime, and Forsterite in Kamafugite; Orthoclase, Nepheline, and Microcline in Phonolite; and Cubanite and Anorthite in Basalt. Phonolite and Mica schist stood out as the most promising sources for nutrient release. K release was influenced by soil type, being higher in clayey soils regardless of the source used, which is associated with greater sink effect and buffering capacity. The pH factor, within the studied range, showed no isolated effect on nutrient release. It was also observed that incubation time promoted a progressive increase in K release, reflecting the low solubility of potassium minerals. Regarding the extractants, Ammonium Acetate generally accessed higher K contents than Mehlich-1, possibly due to accessing non-exchangeable forms of the element. Among the evaluated remineralizers, phonolite and mica schist show the greatest potential considering K release alone; however, financial feasibility studies under field conditions are required to support such potential.

Keywords: Fertility; nutrient; rock dust; DRX; MEV.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 Remineralizadores.....	10
2.2 Difractometria de Raio X	10
2.3 MEV.....	11
2.4 Ensaio	12
2.5 Estatística	12
3 RESULTADOS.....	13
3.1 Composição Mineralógica.....	13
3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	14
3.3 Teores disponíveis de K em Mehlich-1 e Acetato de Amônio	17
3.3.1 Efeito de tempo de Incubação.....	19
3.3.2 Desdobramento do efeito de pH dentro da variável fonte	19
3.3.3 Desdobramento do efeito de tempo dentro solo e fonte	20
4 DISCUSSÃO	22
5 CONCLUSÃO	27
6 REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

A extrema dependência brasileira por importação de fertilizantes potássicos, que representou cerca de 98% do consumo nacional de K para a safra 2022/2023 (ANDA, 2023) torna a agricultura nacional extremamente vulnerável. Essa realidade expõe o agronegócio do país a riscos geopolíticos e à volatilidade de preços. Diante dessa demanda elevada, que atingiu 10,2 milhões de toneladas de KCl em 2022 (MAPA), a prospecção de fontes alternativas de K é estratégica. Nesse cenário, os remineralizadores de solo -RS- (rochas silicatadas moídas) têm ganhado destaque como insumos estratégicos, suportados por políticas públicas, como a Lei 12.890/2013, IN MAPA 05/2016 e Plano Nacional de Fertilizantes (BRASIL, 2022), este último aparato legal propõe incentivar o uso de remineralizadores de solo com o propósito de diminuir efetivamente a dependência externa brasileira.

A eficácia de RS como fontes de K ainda é altamente incerta, tendo em vista os baixos teores do nutriente, a variabilidade mineralógica, reatividade e condições de uso (COSTA JUNIOR *et al.*, 2024). Adicionalmente, é necessário verificar a adequação de métodos analíticos capazes de quantificar de forma preditiva a disponibilidade de K no solo quando do uso desses materiais (COSTA JUNIOR *et al.*, 2024).

Essas lacunas são particularmente relevantes ao considerar a diversidade de remineralizadores registrados e comercializados no Brasil, que já somam 25 produtos (SGB, 2024), com destaque para o estado de Minas Gerais: Verdete, Fonolito, Kama fugito, Micaxisto e Basalto. Devido à baixa solubilidade dos minerais potássicos presentes nessas rochas, tipicamente Micas e Feldspatos, a eficiência agrônômica de curto-prazo é muito baixa (SCHOEN *et al.*, 2016) necessitando de tratamentos adicionais envolvendo ataques ácidos, básicos ou tratamentos térmicos para aumento de eficiência (SANTOS *et al.*, 2015).

Extratores químicos convencionais, como o Acetato de Amônio ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$), ao acessarem que acessa a fração não trocável de K, podem superestimar a disponibilidade do nutriente em solos tratados com remineralizadores, por acessarem formas não liberadas por dissolução dos minerais quando se comparado ao extrator Mehlich-1 (AMORIM, 2014). Todavia o extrator Mehlich-1 também pode superestimar a disponibilidade se acessarem espécies de K não-trocável, devido a sua elevada acidez ($\text{pH} \approx 1.2$) pode dissolver formas estruturais de K superestimando sua disponibilidade. De qualquer modo, a literatura

científica carece de informações sobre o comportamento desses extratores para condições específicas de uso de RS como fontes de K.

Diante do exposto, este estudo propõe investigar o comportamento RS considerando o efeito de condições de solo (acidez e teor de argila) e tempo de reação na cinética de liberação de K.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Remineralizadores

Para este estudo, foram adquiridas amostras dos principais remineralizadores de solo comercializados no estado de Minas Gerais, descritos abaixo, diretamente das empresas fornecedoras. Esses materiais foram selecionados por sua relevância no mercado e ampla utilização na agricultura regional.

Verdete: Rocha metassedimentar formada a partir da deposição de sedimentos, encontrada na serra da saudade, no Cráton São Francisco, na região central mineira. O teor de K_2O nessa rocha é em torno de 6 a 7 % (PIZA *et al.*, 2011).

Fonolito: Rocha ígnea extrusiva, advinda de magma de acidez intermediária, formada no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, com teor médio de K_2O de cerca de 9 % (NETO *et al.*, 2024) e composição mineral à base de Feldspatos (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Kamafugito: Rocha ígnea intrusiva, com formação em Patos de Minas, são compostos geralmente por Feldspatos, Micas e Olivinas, com teores de K_2O de 6 % (SGARBI; GASPAR, 2002).

Micaxisto: Rocha metamórfica foliada, formação nos estados de Goiás e Minas Gerais, compostas por Quartzo e Micas, e com teores de K em torno de 3% (REZENDE, 2022).

Basalto: Rocha ígnea extrusivas, proveniente de magma de composição máfica, formação na Serra Geral, composta por Olivinas, e com teores de K_2O próximos de 1% (LUCHESE *et al.*, 2021).

2.2 Difractometria de Raio X

A composição mineralógica dos remineralizadores foi acessada por meio de Difractometria de Raios X (DRX) nas dependências da Rede de Laboratórios Multiusuários da Universidade Federal de Uberlândia (RELAM). As amostras foram moídas até um tamanho de partícula de $< 0,074$ mm e colocadas em lâmina escavada. Utilizou-se um

difratômetro PHNalytical, modelo LabX-6100, utilizando-se radiação de $\text{CuK}\alpha$ (1,5418 nm) com varredura das amostras na faixa de 4 a $80^\circ 2\theta$, com intervalos de $0,02^\circ 2\theta$ a 1 passo. s^{-1} ; com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA.

A partir dos espectros das amostras, localizaram-se os valores centrais em graus 2θ nas assinaturas espectrais (picos) e aplicando-se a equação de Bragg- Eq 1- (Bragg & Bragg, 1913) calculou-se o valor “d”, que representa a distância entre planos atômicos espalhadores na estrutura mineral.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo n: ordem de difração, λ : comprimento de onda, d= distância interplanar e θ : ângulo de incidência.

Como fonte de dados, utilizou-se a American Mineralogist Crystal Structure Database (RRUFF), um banco de dados que compila resultados de pesquisas publicadas em revistas de mineralogia dos EUA e Canadá, no European Journal of Mineralogy, em periódicos de Química e Física de Materiais, além de outras publicações selecionadas pela Mineralogical Society of America (Downs e Hall-Wallace, 2003).

2.3 MEV

A análise estrutural dos remineralizadores foi feita a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), uma técnica que utiliza de um feixe de elétrons focalizado que varre a superfície da estrutura, fazendo com que esses elétrons interajam com a matéria, de forma que é possível analisar a energia dos elétrons durante o processo de interação, também conhecida como Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). Essa energia é interpretada pelo equipamento gerando imagens de alta definição.

A composição dos remineralizadores de solo foi acessada por meio Microscópio eletrônico de Varredura, equipamento Tescan, modelo VEJA 3 LMU, e uma dimensão de amostra de 20 mm de comprimento por 10 mm de largura, nas dependências da Rede de Laboratórios Multiusuários da Universidade Federal de Uberlândia (RELAM).

A partir da Microscopia Eletrônica de Varredura foram analisados e comparados com os Sistemas Cristalinos de cada mineral encontrado por meio da DRX. O Sistema Cristalino de cada mineral foi apurado pelo site Mineralogy Database utiliza dados provenientes de fontes, como Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e o Serviço Geológico do

Brasil (CPRM), e possibilitou a caracterização do sistema cristalino e a identificação na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

1. Ensaio

A dinâmica de liberação de K foi avaliada em experimento conduzido em esquema fatorial $7 \times 2 \times 2 \times 3$, compreendendo 6 fontes de K: Verdete, Fonolito, Micaxisto, Kamafugito, Basalto, KCl e tratamento controle (sem adição de K); dois solos com texturas contrastantes (arenosa e argilosa), sob dois níveis de pH (5,0 e 6,5), três períodos de incubação (60, 120 e 180 d) e dois tratamentos controle (sem adição de K em ambos os solos). O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições. Para cada uma das fontes foi utilizada uma dose padrão de 200 mg/dm³ de K.

A unidade experimental consistiu-se em 1 kg de solo acondicionado em saco plástico. O ajuste do pH para 6,5 foi realizado após teste preliminar com doses crescentes de CaCO₃ para determinação da quantidade exata para atingir o pH desejado. As amostras dos remineralizadores, previamente moídas e peneiradas (0,3 mm), foram homogeneizadas às amostras de solo e mantidas incubadas a cerca de 80 % da capacidade máxima de retenção de água (Capacidade de Campo).

Em cada período de avaliação, subamostras de 100 g de solo foram coletadas, secas ao ar e peneiradas (malha de 2 mm) para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA).

A quantificação do K disponível foi realizada mediante extração com Mehlich-1 ou Acetato de Amônio (NH₄CH₃CO₂), seguida de dosagem por espectrofotometria de emissão de chama, em equipamento Micronal, modelo b-462.

2.4 Estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância, no programa SISVAR, sendo o efeito de solo, pH e interações verificados pelo teste F. O efeito de tempo foi avaliado por meio de regressão linear simples. As fontes foram comparadas pelo Scott-Knott. A probabilidade dos testes foi de 0,05. Os gráficos foram elaborados no software SigmaPlot.

3 RESULTADOS

3.1 *Composição Mineralógica*

Os remineralizadores revelam grande diversidade em termos de composição mineralógica (Figura 1). No Basalto identificou-se a Cubanita ($d=3,21; 4,05; 3,21; 2,74$ e $1,78 \text{ \AA}$), Quartzo ($d=4,05; 3,21$ e $1,78 \text{ \AA}$), Andesina ($d=4,05; 1,65; 3,21; 1,53; 2,52$ e $2,14 \text{ \AA}$), Augita ($d=1,65$ e $1,63 \text{ \AA}$) e Clinopiroxênio ($d=3,65; 1,65$ e $2,62 \text{ \AA}$). Já no Verdete verificou-se a presença de Glauconita ($d=10,01; 4,99; 4,51; 3,34; 2,57; 2,12$ e $1,54 \text{ \AA}$), Quartzo ($d=4,26; 3,34$ e $1,51 \text{ \AA}$), Forsterita ($d=3,78; 3,48; 3,00; 2,57$ e $2,40 \text{ \AA}$). No Kamafigito foram identificados Perovskita ($d=3,23; 2,80; 2,71$ e $2,61 \text{ \AA}$), Caulinita ($d=4,55; 4,24; 4,06 \text{ \AA}$), Olivina ($d=4,24$ e $3,98 \text{ \AA}$), Forsterita ($d=3,81; 3,52; 2,52$ e $2,42 \text{ \AA}$), Richterita ($d=3,23; 2,80$ e $2,71 \text{ \AA}$), Analcita ($d=3,45; 3,00$ e $2,80 \text{ \AA}$), Diópsídio ($d=2,96; 2,52$ e $1,80 \text{ \AA}$), e Muscovita ($d=10; 2,96; 2,52; 1,61$ e $1,48 \text{ \AA}$). No Fonolito identificou-se o Ortoclásio ($d=6,64; 4,20; 3,78 \text{ \AA}$), Andesina ($d=5,62; 2,93 \text{ \AA}$), Microclíneo ($3,44$ e $3,25 \text{ \AA}$), e Nefelina ($d=3,85; 3,78; 3,28; 2,90; 2,51; 2,35$ e $2,17 \text{ \AA}$). E por fim, no Micaxisto identificou-se os minerais Diópsídio ($d=3,66 \text{ \AA}$), Estauroлита ($d=3,53 \text{ \AA}$), Muscovita ($d=3,34; 1,99 \text{ \AA}$), Cianita ($d=3,19 \text{ \AA}$), Andesina ($d=2,93; 1,37 \text{ \AA}$), Leucita ($d=2,48 \text{ \AA}$), Quartzo ($d=2,28; 2,12; 1,54 \text{ \AA}$), e Anortita ($d=2,52; 2,02; 1,78; 1,37 \text{ \AA}$).

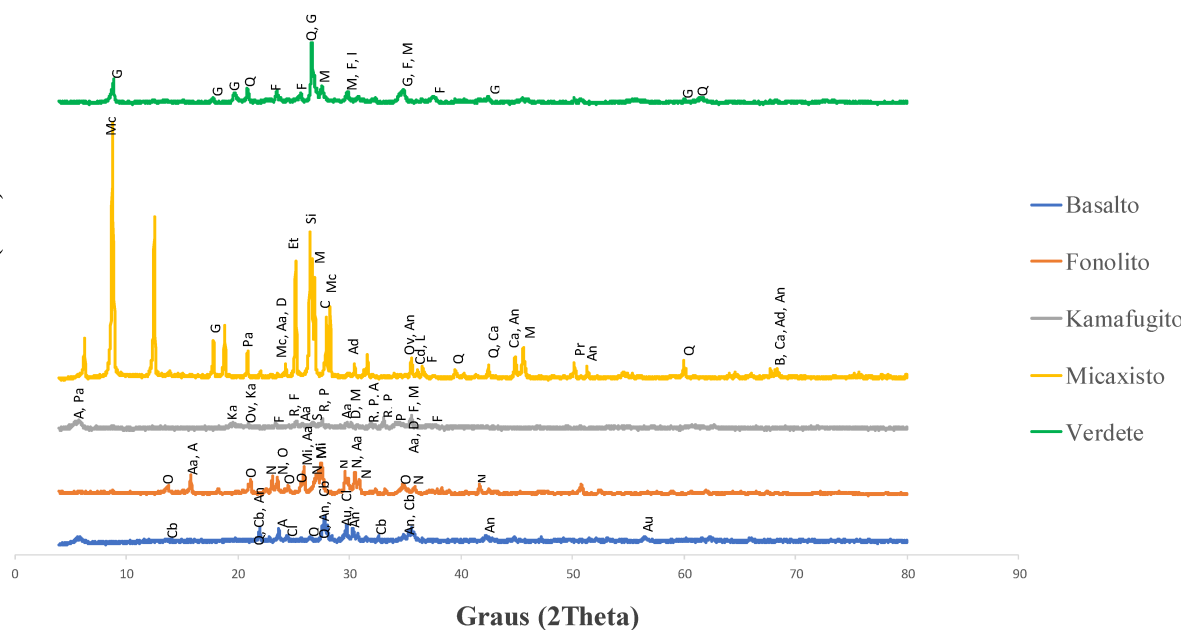


Figura 1. Composição Mineralógica de Remineralizadores de Solo produzidos no Estado de Minas Gerais. CuK α (1,5418 nm).

Aa: Analcima; Ad: Andesina; An: Anortita; Au: Augita; B: Biotita; Ca: Caulinita; C: Cianita; Cl: Cinopiroxênio; Cd: Celadonita; Cb: Cubanita; D: Diopsídio; E: Esmeclita; Et: Estauroilita; F: Fosterita; G: Glauconita; I: Ilita; Ka: Kaolinita; K: Feldspato-K; Fl: Feldspato; L: Leucita; N: Nefelina; Mf: Magnesioferrita; M: Muscovita; Mi: Microclíneo; Mc: Mica; Ov: Olivina; O: Ortoclasio; Pr: Piroxênio; Pa: Paragonita; P: Peroviskita; Q: Quartzo; R: Richterita; S: Shirokshinita; Si: Silimanita

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens produzidas por MEV permitiram observar minerais com diferentes estruturas cristalinas nos materiais, destacando-se sistemas Ortorrômico e Triclínico no Basalto (Figura 2), Hexagonal, Monoclínico e Triclínico no Fonolito (Figura 3), Ortorrômico e Triclínico no Kama fugito (Figura 4), Ortorrômico, Monoclínico, Triclínico e Tetragonal no Micaxisto (Figura 5) e Monoclínico e Trigonal no Verdete (Figura 6).

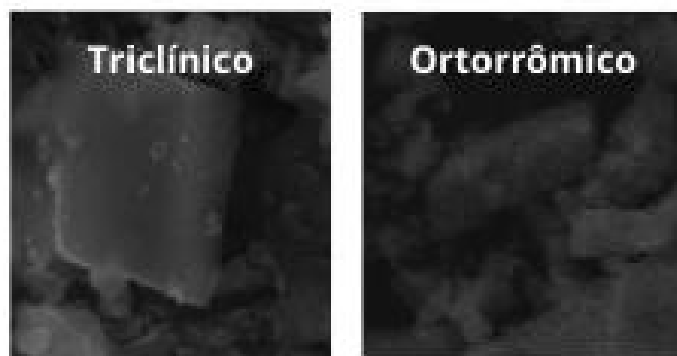


Figura 2. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do Remineralizador Basalto, destacando estruturas que se enquadraram em diferentes sistemas cristalinos.

Fonte: Autor



Figura 3. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do Remineralizador Fonolito, destacando estruturas que se enquadraram em diferentes sistemas cristalinos.

Fonte: Autor



Figura 4. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do Remineralizador Kamafugito, destacando estruturas que se enquadraram em diferentes sistemas cristalinos.

Fonte: Autor

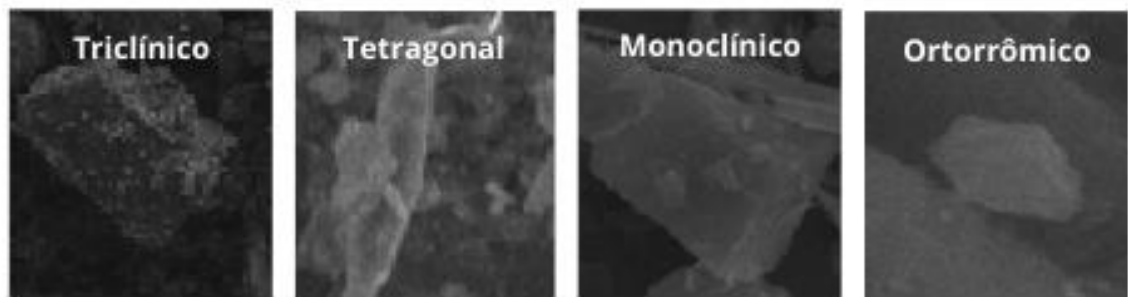


Figura 5. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do Remineralizador Micaxisto, destacando estruturas que se enquadraram em diferentes sistemas cristalinos.

Fonte: Autor

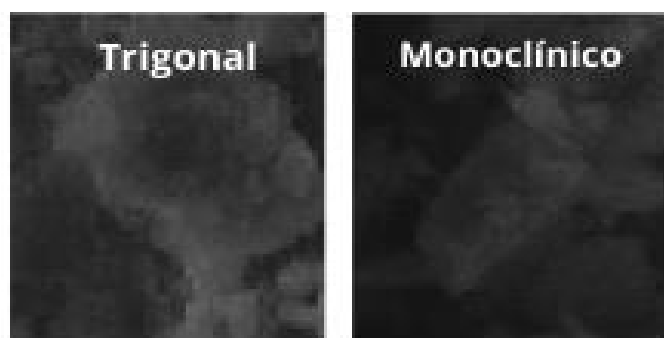


Figura 6. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do Remineralizador Verdete, destacando estruturas que se enquadraram em diferentes sistemas cristalinos.

Fonte: Autor

2. Teores disponíveis de K em Mehlich-1 e Acetato de Amônio

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para os teores de K, obtidos pelos extratores Mehlich-1 (M-1) e Acetato de Amônio (AA), encontram-se na Tabela 1. Para os efeitos principais, as variáveis solo, fonte e tempo foram significativas, já o pH não apresentou efeito significativo para nenhum dos dois métodos de extração. A ordem de importância dos efeitos principais, de acordo com os Quadrados Médios, foi: fonte > solo > tempo. Dentre as interações duplas, apenas Solo*Fonte foi significativa para o extrator AA, enquanto a interação pH*Fonte foi significativa para ambos. Não foram detectadas interações triplas ou quádruplas.

Tabela 1. Análise de variância para os teores de K nos extratores Mehlich-1 e Acetato de Amônio, em função de tempo, fonte, pH e solo, e interações correspondentes.

FV	GL	QM_Mehlich-1	QM_Acetato de Amônio
Solo	1	37 505,32***	56 634,08***
pH	1	1,38	3,23
Fonte	6	151 349,70***	251 619,89***
Tempo	2	4 088,61***	4 525,94***
Solo * pH	1	17, 69	5,44
Solo * Fonte	6	144, 86	1 045,09***
Solo * Tempo	2	135,31	244,43
pH * Fonte	6	413,80***	970,31***
pH * Tempo	2	171,34	8,41
Solo * pH * Fonte	6	29,89	40,44
Solo * pH * Tempo	2	74,89	25,91
Solo * Fonte * Tempo	12	155, 54	18,02
Solo * pH * Fonte * Tempo	12	55, 02	84,22
Erro	276	103,17	124,35
Total	335		
CV (%)		21,66	18,37

*** significativo ao 0,1* pelo teste F. QM= quadrado médio

Os teores de K nos extratores Mehlich-1 e Acetato de Amônio para cada fontes são apresentados na Tabela 2. Para ambos os extratores o KCl foi a fonte de maior liberação de K, seguido do Micaxisto em segundo e o Fonolito em terceiro. As demais fontes não se diferiram do tratamento Controle, indicando uma baixa ou nula liberação de K.

Tabela 2. Teores de K nos extratores Mehlich-1 e Acetato de Amônio considerando a variação de fontes do nutriente

Fonte	Mehlich-1	Acetato de Amônio
	-----mg dm ⁻³ -----	
Controle	17,10 d	27,8 d
Verdete	17,28 d	29,7 d
Basalto	18,09 d	29,7 d
Kamafugito	18,10 d	30,4 d
Micaxisto	36,18 c	38,1 c
Fonolito	50,64 b	44,9 b
KCl	170,85 a	224,3 a

*Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott (p = 0,05)

3.2.1 Efeito de tempo de incubação

Modelos lineares explicaram satisfatoriamente o efeito do tempo de incubação (x) sobre os teores de K extraídos (\hat{y}) por ambos os métodos. Conforme demonstrado pelas Equações 1 e 2, o parâmetro β_1 foi altamente significativo (***, $p < 0,001$ pelo teste t) para os dois extratores.

$$\hat{y}_{M-1} = 34,88 + 0,1045^{***} x \quad R^2 = 0,988 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\hat{y}_{AA} = 48,14 + 0,1000^{***} x \quad R^2 = 0,973 \quad (\text{Eq. 2})$$

3.2.2 Desdobramento do efeito de pH dentro da variável fonte

Verificou-se que, para o extrator Mehlich-1 (M-1) em ambos os valores de pH, excluindo-se o KCl devido à sua evidente superioridade (fonte solúvel), os teores de K extraídos foram maiores para o Micaxisto, seguido pelo Fonolito (Tabela 3). As demais fontes não diferiram estatisticamente do tratamento-controle. Comportamento semelhante foi observado para o extrator Acetato de Amônio (AA) em pH 6,5. Entretanto, em pH 5,0, após o KCl, os teores de K foram superiores para o Fonolito, seguidos pelo Micaxisto.

Tabela 3. Desdobramento de efeito de pH dentro da variável fonte nos teores de K acessados pelos métodos Mehlich-1 e Acetato de Amônio

Fonte	Mehlich-1		Acetato de Amônio	
	pH 5,0	pH 6,5	pH 5,0	pH 6,5
-----mg/dm ³ -----				
-				
Verdete	17,7 d	16,9 d	30,2 c	29,1 d
Controle	18,5 d	15,7 d	28,1 c	27,6 d
Kamafugito	18,8 d	17,4 d	30,6 c	30,2 d
Basalto	18,8 d	17,3 d	30,4 c	28,9 d
Fonolito	37,9 c	34,5 c	50,6 b	39,1 c
Micaxisto	44,0 b	57,3 b	29,0 c	47,2 b
KCl	172,1 a	169,6 a	226,6 a	222,0 a

*Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott (p=0,05)

3.2.3 Desdobramento do efeito de tempo dentro Solo e Fonte

Na Figura 7 estão apresentados modelos de regressão que relacionam o efeito do tempo de incubação dos RS em solo argiloso e arenoso nos teores disponíveis de K pelo extrator Mehlich-1 para as diferentes fontes do nutriente. Com três níveis para tempo (60, 120 e 180 d) apenas modelos lineares de regressão foram testados, sendo altamente significativos para as fontes, exceto Micaxisto em solo argiloso. Em solo arenoso, verificaram-se significâncias apenas para KCl e Micaxisto.

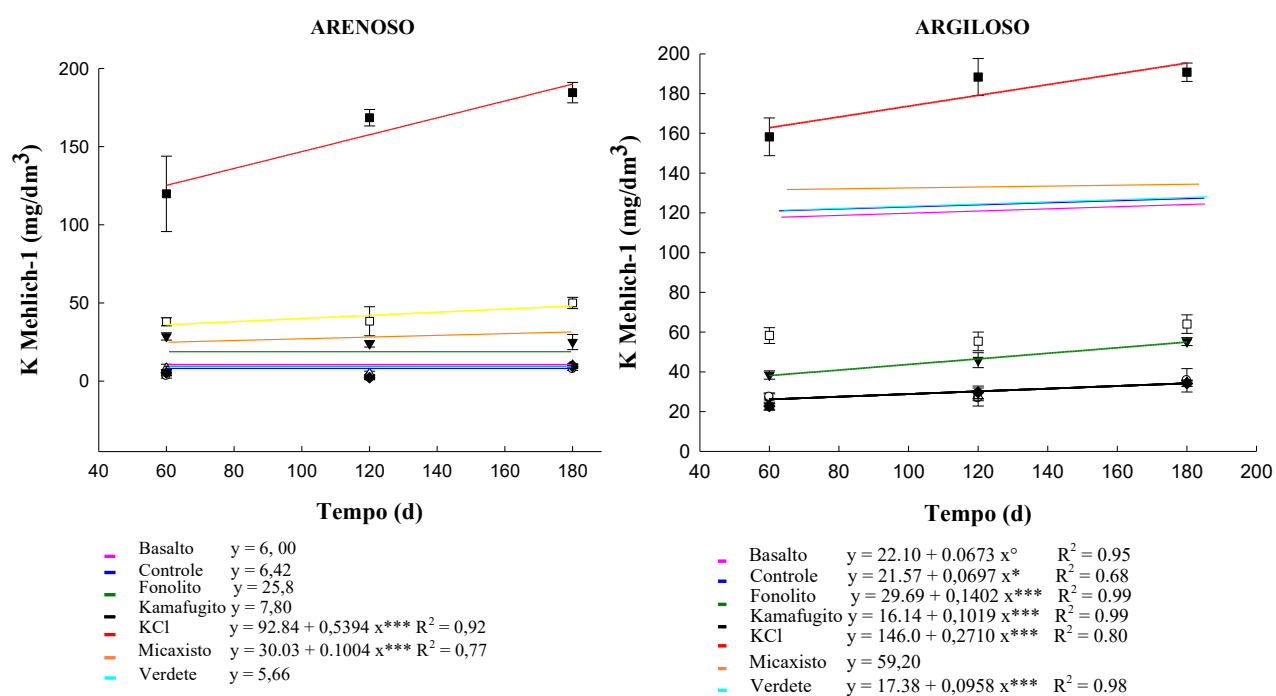


Figura 7. Efeito do tempo de incubação de solo argiloso e arenoso com diferentes fontes de K nos teores disponíveis do nutriente para o extrator Mehlich-1.

4 DISCUSSÃO

1. *Difratometria de Raio X*

A composição mineralógica dos RS coincide com resultados de outros estudos, mas também apresenta novas fases. No Fonolito têm sido detectados os minerais Microclínio (Teixeira *et al.*, 2012), Ortoclásio (Teixeira *et al.*, 2012), Nefelina (Teixeira *et al.*, 2012), Andesina (Teixeira *et al.*, 2012) e Andaluzia (Teixeira *et al.*, 2012).

A composição do Micaxisto, tem-se detectado Mica (Silva *et al.*, 2021), Glauconita (Silva *et al.*, 2021) e Caulinita (Silva *et al.*, 2021). No entanto, para outros minerais, Muscovita e Olivina, não foram encontrados relatos

Para a composição do Basalto, houve extensa concordância com a literatura com a ocorrência de Anortita (LEWIS *et al.*, 2021), porém para o mineral Cubanita não foram encontrados relatos.

A composição do Verdete, à base de Quartzo (Silva *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2015), Glauconita (Silva *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2015) e Feldspatos (Santos *et al.*, 2015) tem amplo respaldo na literatura.

2. *Microscopia eletrônica de Varredura*

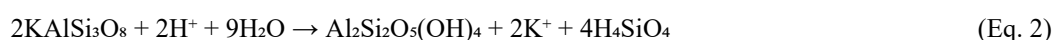
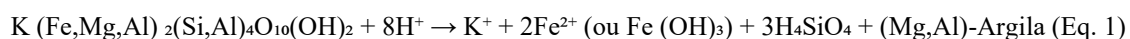
A identificação dos sistemas trigonal e monoclinico no Verdete está de acordo com a identificação por DRX dos minerais Glauconita e Muscovita, cujas estruturas são compatíveis. Já para o Basalto, os sistemas cristalinos triclinico e ortorrômico, estão de acordo com os minerais Anortita e Cubanita, sendo estruturas compatíveis. Para o Micaxisto, os sistemas triclinico, tetragonl, monoclinico e ortorrômico, estão de acordo com os mineriais Glauconita, Muscovita, Anortita, Caulinita e Olivina, com estruturas compatíveis. No remineralizador Fonolito os sistemas, triclinico, monoclinico e hexagonal estão correlacionados com os minerais Microclínio, Ortoclásio, Nefelina e Analcima. Por fim, para o Kama fugito, os sistemas ortorrômico e triclinico, estão correlacionados com os minerais Caulinita, Analcima e Richeterita.

3. *Efeito solo*

A maior extração de K, para ambos os extratores, em solo argiloso está relacionada à sua maior capacidade de tamponamento da acidez e ao efeito dreno. Essas propriedades são mais expressivas em solos argilosos devido a maior presença de coloides, que promovem desequilíbrios químicos no solo. Esse desequilíbrio aumenta a demanda por íons na solução, favorecendo reações de troca iônica e dissolução que intensificam a liberação de K pelos minerais nos remineralizadores (NOVAIS *et al.*, 2007; REETZ, 2016). Em solos arenosos, esse efeito ocorre de forma menos pronunciada, uma vez que a baixa presença de partículas carregadas em sua estrutura limita a ocorrência de desequilíbrios químicos significativos e, conseqüentemente, reduz a liberação de K.

4. *Efeito pH*

Apesar do conhecido papel dos íons H^+ na dissolução de silicatos, a variação de acidez de pH 6,5 para 5,0 não resultou em um aumento efetivo na dissolução dos minerais potássicos Glauconita (Eq. 1) e Microclínio (Eq. 2).



Este resultado, aparentemente paradoxal, pode ser elucidado por uma série de mecanismos que atuam em conjunto, mitigando o efeito esperado do aumento da acidez. Uma das hipóteses centrais reside na cinética intrinsecamente lenta da dissolução de silicatos e no fenômeno de formação de camadas de intemperismo. O processo de dissolução não é simplesmente uma função linear da concentração de H^+ . À medida que o mineral é atacado, os produtos da reação, como sílica amorfa (H_4SiO_4) e, novos minerais secundários, podem se acumular na superfície do grão mineral original. Esta camada de alteração atua como uma barreira física, impedindo a difusão dos íons H^+ do núcleo não dissolvido e a liberação dos íons K^+ para a solução do solo. Dessa forma, a reação torna-se autocontrolada pela taxa de difusão através desta capa, tornando-se progressivamente menos sensível a mudanças adicionais no pH.

Além da barreira física, a natureza dos argilominerais secundários formados desempenha um papel fundamental, particularmente para Micas, como a

Glaucônita. A transformação deste mineral pode gerar fases expansivas, como Esmeclitas ou Vermiculitas, que possuem alta CTC (LACERDA *et al.*, 2001; BRITZKE *et al.*, 2011). Esses minerais podem readsorver o K^+ que foi inicialmente liberado da estrutura original. Portanto, embora a dissolução tenha tecnicamente ocorrido, parte do K^+ pode ter permanecido retido na fração sólida do solo, não sendo detectado como um aumento na concentração na solução. Assim, mesmo em pH 5,0 pode até ter facilitado a dissolução, mas simultaneamente poderia ter promovido uma maior retenção do cátion liberado.

Em conclusão, a aparente inefetividade do pH 5,0 em promover maior liberação de K^+ não invalida as equações de dissolução ácida, porém expõe a complexidade dos processos pedogenéticos dos equilíbrios precipitação-dissolução de minerais silicatados potássicos. O resultado é perfeitamente explicável pela imposição de fatores cinéticos (formação de camadas de intemperismo) e geoquímicos (readsorção), que, em conjunto, regula o sistema e pode ter suplantado o efeito primário da atividade de H^+ na faixa de variação de pH do estudo (5,0 para 6,5).

5. *Efeito Fonte*

Como esperado, o KCl foi a fonte que apresentou a maior liberação de potássio, devido à sua elevada solubilidade em água, o que permite a rápida disponibilidade do nutriente para as plantas. Em contraste, os remineralizadores de solo possuem estruturas cristalinas menos solúveis, limitando a liberação imediata de K e tornando o processo mais dependente de intemperismo químico e reações de troca iônica no solo (RAMOS *et al.*, 2023).

Entre os remineralizadores analisados, o Fonolito e o Micaxisto se destacaram como fontes mais promissoras de Potássio. Essa maior potencialidade pode estar associada à sua solubilidade relativamente superior em comparação com outros remineralizadores, mesmo que ainda seja baixa se comparada à do KCl. Além disso, características minerais específicas desses materiais, como a presença de minerais potássicos pouco resistentes à dissolução, podem favorecer uma liberação gradual de K, sugerindo que esses remineralizadores apresentam maior eficiência a médio e longo prazo.

6. *Efeito tempo*

O tempo é um fator determinante nas reações de dissolução e precipitação de minerais silicatados devido à sua cinética, em geral, lenta (PIZA *et al.*, 2011). Inicialmente, a dissolução incongruente dos silicatos primários, como os Feldspatos, libera cátions na solução e deixa um resíduo reorganizado que forma os primeiros minerais secundários, como os argilominerais. Este processo, entretanto, não é instantâneo; demanda um período prolongado para que as ligações covalentes fortes da rede silicatada sejam quebradas e para que os produtos se acumulem no meio (Harley e Gilkes, 2000).

Com o decorrer do tempo, a concentração desses elementos em solução atinge níveis de saturação, permitindo a precipitação de fases secundárias estáveis diretamente da solução aquosa. Em escalas de tempo, estes minerais podem, por sua vez, sofrer nova dissolução e recristalização, evoluindo para fases ainda mais estáveis em um processo contínuo de ajuste ao equilíbrio termodinâmico. Portanto, o tempo atua como o agente catalisador que permite a transformação completa de um mineral primário, instável sob condições superficiais, em uma sequência de minerais secundários. Essa dinâmica é fortemente afetada pela capacidade do sistema em lixiviar os produtos da dissolução, deslocando mais ou menos o equilíbrio no sentido dos produtos ou estabilizando os reagentes diminuindo a velocidade de reação.

7. *Extratores*

A observação de que o extrator Acetato de Amônio pH 7,0 determinou, em geral, teores de K consistentemente superiores aos do Mehlich-1 é um fenômeno revela sobre a natureza distinta de cada método e a forma como eles interagem com esses minerais silicatados. Esta disparidade não indica uma ineficiência do Mehlich-1, mas sugere que os dois extratores quantificam diferentes formas de K no solo (AMORIM, 2014)

A explicação da diferença pode estar associada ao mecanismo de extração dos dois métodos:

O Mehlich-1 é um extrator de caráter ácido forte. Seu principal mecanismo é a dissolução por ataque químico via prótons (H^+). Ao ser adicionado ao solo, os íons H^+

protonam a superfície dos minerais, quebrando ligações e solubilizando parcialmente a estrutura dos silicatos. No entanto, este ataque ácido parece ser inespecífico.

No contexto de Micas e Feldspatos, o ataque ácido forte pode levar à rápida formação de uma camada de produtos de alteração (como géis de sílica e hidróxidos de alumínio) na superfície dos grãos minerais. Esta camada atenua a dissolução impedindo que o ataque ácido prossiga. Consequentemente, o Mehlich-1 tenderia a dissolver apenas uma fração superficial do mineral. Considerando que a taxa de recuperação de K pelo M-1 foi inferior a 100% quando a fonte foi o KCl, subentende-se que sua extração se limitou a formas trocáveis.

O Acetato de Amônio a pH 7,0 possui mecanismo completamente distinto e mais sofisticado, a troca catiônica seletiva. O íon NH_4^+ possui um raio iônico similar ao do K^+ , tornando-o um competidor perfeito pelos mesmos sítios de ligação, possibilitando além do acesso as formas trocáveis, também formas não trocáveis, especialmente em Micas (AMORIM, 2014)

5 CONCLUSÃO

Os principais minerais potássicos presentes nos remineralizadores pertencem ao grupo dos Feldspatos e Micas;

Maiores teores de K extraídos em solo argiloso, independentemente da fonte, sugere que mecanismos de tamponamento de acidez ou maior efeito-dreno para elementos estruturais como Si e K nesse solo afetam a dissolução de minerais potássicos presentes nos remineralizadores.

As diferenças entre as fontes indicam variações em suas reatividades no solo, com destaque para o Fonolito e o Micaxisto como as fontes mais reativas.

Teores médios de K consistentemente mais elevados no extrator Acetato de Amônio indicam que esse método é capaz de acessar frações não trocáveis de K na estrutura dos minerais.

Por se tratar de fontes de baixa solubilidade (silicatadas), o tempo de incubação é um fator crítico para a liberação progressiva de K desses remineralizadores, uma vez que a dissolução desses materiais depende de processos cineticamente limitantes, como as baixas solubilidade e reatividade.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, M. B.. **Métodos de avaliação da disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciências do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BRASIL. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Balanço de Fertilizantes**, 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano Nacional de Fertilizantes**: estatísticas do setor. Estatísticas do Setor. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto do SGB visa levantar fontes de minerais e rochas para emprego nas técnicas de remineralização ou condicionamento de solos**. 2024. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/w/projeto-do-sgb-visa-levantar-fontes-de-minerais-e-rochas-para-emprego-nas-tecnicas-de-remineralizacao-ou-condicionamento-de-solos?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 09 ago. 2025.
- BRITZKE, D. *et al.* A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical Brazilian lowlands. *Journal Of Soils And Sediments*, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 185-197, 20 set. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11368-011-0431-7>.
- BARTHELMY, D. Banco de Dados de Mineralogia. 2014. Disponível em: <https://webmineral.com/>. Acesso em: 05 jan. 2026
- COSTA JUNIOR, A. *et al.* Glauconite as a potential source of potassium in Brazilian agriculture - a review. *Revista Ciência Agrônômica*, [s.l.], v. 55, 2024. GN1 Sistemas e Publicacoes Ltd..
- LACERDA, M. P. C. *et al.* Transformações mineralógicas ao longo de perfis de alteração pedogenética na região de Lavras (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], v. 25, n. 0, p. 799-809, 2001.
- LEWIS, A. L. *et al.* **Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering**. Elsevier. Lancaster, p. 0-0. maio 2021.
- LUCHESI, A. V.; PIVETTA, L. A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. *African Journal of Agricultural Research*, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 487–497, 2021. DOI: 10.5897/AJAR2020.15234. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350657735_Agronomic_feasibility_of_using_basalt_powder_as_soil_nutrient_remineralizer. Acesso em: 8 set. 2025.
- NETO, A. R.; MELLO PRADO, R.; CRUZ, M. C. P. The Impact Ground Phonolite Rock's Potassium Solubilization in Tropical Soil Depends on the Cultivated Forage Species. *Plants, Basel*, [s.l.], v. 13, n. 2, art. 199, 2024. DOI: 10.3390/plants13020199

- NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Roberto Ferreira Novais, 2007.
- PIZA, P. D. T. *et al.* Verdete da região de Cedro de Abatê (MG) como fonte alternativa de Potássio. **Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 345-356, 2011.
- RAMOS, M. N. *et al.* **Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region)**. Mdpi. Salvador, p. 0-0. 24 set. 2023.
- REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu Uso Eficiente**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2016. 178 p.
- SANTOS, W. O. *et al.* Solubilização térmica e química de Verdete para uso como fertilizante potássico. **International Journal of Mineral Processing**, [s.l.], v. 140, p. 72-78, 2015.
- SGARBI, P. B. A.; GASPAR, J. C. Geochemistry of Santo Antônio da Barra Kamafugites, Goiás, Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 14, n. 8, p. 889-901, mar. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0895-9811\(01\)00079-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0895-9811(01)00079-7).
- SILVA, A. A. S. *et al.* **Caracterização do Verdete de Cedro do Abaeté para o desenvolvimento de um material com liberação controlada de potássio**. *Holos*, v. 5, p. 42-51, out. 2012.
- SCHOEN, C.; AUMOND, J. J.; STÜRMER, S. L. (2016). **Efficiency of the on-farm mycorrhizal inoculant and phonolite rock on growth and nutrition of Schinus terebinthifolius and Eucalyptus saligna**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0150440. <https://doi.org/00430>
- TEIXEIRA, A. M. S.; SAMPAIO, J. A.; GARRIDO, F. M. S.; MEDEIROS, M. E. Avaliação da rocha Fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **Holos**, [s.l.], v. 5, p. 21-33, 2012.
- TEIXEIRA, A. M. S. *et al.* Caracterização da rocha Fonolito pelas técnicas de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e infravermelho. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 34., 2011, Florianópolis. **Caracterização da rocha Fonolito pelas técnicas de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e infravermelho**. Florianópolis: Sqb, 2011.