

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**REMINERALIZADORES E KCl COMO FONTE DE POTÁSSIO PARA A SUCESSÃO
SOJA-MILHO**

JAQUELINE MARINEZ ROSA

DOURADOS

MATO GROSSO DO SUL

2025

**REMINERALIZADORES E KCl COMO FONTE DE POTÁSSIO PARA A SUCESSÃO
SOJA-MILHO.**

JAQUELINE MARONEZ ROSA

Engenheira agrônoma

Orientadora: PROFA. DRA. ALESSANDRA MAYUMI TOKURA ALOVISI

Coorientadora: PROFA. DRA. ELISÂNGELA DUPAS

Tese apresentada à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das
exigências do Programa de pós-Graduação
em Agronomia – Produção Vegetal, para
obtenção do título de Doutora.

Dourados

Mato Grosso do Sul

2025

**REMINERALIZADORES E KCI COMO FONTE DE POTÁSSIO PARA A SUCESSÃO
SOJA-MILHO.**

por

Jaqueline Maronez Rosa

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de

DOUTORA EM AGRONOMIA

Aprovada em: __/__/____

Profa. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovisei

Orientadora – FCA/UFGD

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Membro Titular Externo – UNESP/Ilha Solteira

Profa. Dra. Elisângela Dupas

Membro Titular Interno – FCA/UFGD

Profa. Dra. Elcio Ferreira dos Santos

Membro Titular Interno – FCA/UFGD

Prof. Dr. Vagner do Nascimento

Membro Titular Externo – UNESP/Dracena



ATA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO APRESENTADA POR JAQUELINE MARONEZ ROSA, ALUNA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "PRODUÇÃO VEGETAL".

Aos sete dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco, às treze horas e trinta minutos, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Tese de Doutorado intitulada **"Remineralizadores e KCl como fontes de potássio para a sucessão soja-milho"**, apresentada pela doutoranda Jaqueline Maronez Rosa, do Programa de Pós-graduação em Agronomia, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof.^a Dr.^a Alessandra Mayumi Tokura Alovisei/UFGD (presidente/orientadora), Prof. Dr. Elcio Ferreira dos Santos/IFMS (membro titular interno), Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho/UNESP (membro titular externo), Prof.^a Dr.^a Elisangela Dupas/UFGD (membro titular externo), Prof. Dr. Vagner do Nascimento/UNESP (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer à candidata e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Tese. Após a candidata ter apresentado a sua Tese, os componentes da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo sido a candidata considerada **APROVADA**. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 07 de novembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br ALESSANDRA MAYUMI TOKURA ALOVISEI
Data: 14/11/2025 09:24:50-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Alessandra Mayumi Tokura Alovisei
Presidente/orientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ELICIO FERREIRA DOS SANTOS
Data: 17/11/2025 13:20:10-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Elcio Ferreira dos Santos
Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 13/11/2025 17:36:22-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Filho
Membro Titular Externo

Documento assinado digitalmente
gov.br ELISANGELA DUPAS
Data: 13/11/2025 18:28:02-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Elisangela Dupas
Membro Titular Externo

Documento assinado digitalmente
gov.br VAGNER DO NASCIMENTO
Data: 14/11/2025 15:33:20-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Vagner do Nascimento
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPP)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

R789r Rosa, Jaqueline Maronez
REMINEALIZADORES E KCI COMO FONTE DE POTÁSSIO PARA A SUCESSÃO
SOJA-MILHO. [recurso eletrônico] / Jaqueline Maronez Rosa. -- 2025.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Alessandra Mayumi Tokura Alovisei.
Coorientador: Elisângela Dupas.
Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Dessorção de Potássio. 2. Lixiviação de Potássio. 3. Rochas potássicas. I. Alovisei, Alessandra
Mayumi Tokura. II. Dupas, Elisângela. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.”
(Nelson Mandel)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por seu imenso amor e cuidado. Sua presença em minha vida, me manteve forte e disposta a viver tudo que a vida me proporcionou.

À minha família, de modo especial ao meu esposo Álvaro Diego Becegato e a nosso filho Arthur Maronez Becegato, pelo amor dedicados a mim durante toda minha trajetória.

À minha mãe Zelma Maronez Rosa, a meu Pai David Rosa e à minha Irmã Juliana Maronez Rosa, agradeço por todo apoio, cuidado e incentivo, por sonharem comigo e hoje vivermos juntos a alegria dessa realização. Sem essa rede de apoio, repleta de amor, carinho e compreensão eu não conseguiria. Vocês são meu alicerce!

À Universidade Federal da Grande Dourados e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela construção do conhecimento e realização de um sonho.

À minha orientadora Profa. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovisei, por todo incentivo, apoio e contribuição para o meu crescimento acadêmico. Agradeço a oportunidade de conhecer e ser orientada por uma profissional comprometida, ética e paciente.

À minha coorientadora Profa. Dra. Elisângela Dupas agradeço por todas as orientações que foram repletas de conhecimento e principalmente acolhimento e leveza.

Aos examinadores deste trabalho, Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, Profa. Dra. Elisângela Dupas, Prof. Dr. Elcio Ferreira dos Santos e Prof. Dr. Vagner do Nascimento pelas valiosas contribuições, sugestões e observações que enriqueceram significativamente este trabalho. Agradeço pela dedicação, disponibilidade e pelo compartilhamento de seus conhecimentos, que contribuíram de forma essencial para o aprimoramento desta pesquisa.

Aos amigos James Luan Noleto Leite, Bruno Lenhart Pinheiro, Hercules Lazari Meurer, Isabela Xavier, Grégori França Kintschev e Mamadou Cellou Diallo, obrigada pela ajuda e contribuição e pelos momentos de risada vividos ao longo do doutorado. Agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu pudesse viver a alegria dessa realização.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	10
RESUMO GERAL.....	15
ABSTRACT.....	17
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	20
2.1 Aspectos econômicos das culturas da soja e do milho.....	20
2.1.1 Cultura da soja.....	23
2.1.2 Cultura do milho.....	24
2.2 Fontes de fertilizantes contendo potássio.....	25
2.2.1 Cloreto de Potássio (KCl).....	25
2.2.2 Fontes alternativas de fertilizantes.....	26
2.3 Agricultura regenerativa.....	27
3. HIPÓTESE.....	29
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
 CAPÍTULO I. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A UTILIZAÇÃO DE REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO.....	 40
RESUMO.....	40
ABSTRACT.....	41
INTRODUÇÃO.....	41
MATERIAL E MÉTODOS.....	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
CONCLUSÃO.....	65

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
---------------------------------	----

**CAPÍTULO II: OS REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO PODEM
SUBSTITUIR O FERTILIZANTE KCL?.....70**

RESUMO.....	70
-------------	----

ABSTRACT.....	71
---------------	----

INTRODUÇÃO.....	72
-----------------	----

MATERIAL E MÉTODOS.....	75
-------------------------	----

RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
-----------------------------	----

CONCLUSÃO.....	120
----------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
---------------------------------	-----

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
---------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A UTILIZAÇÃO DE REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO

Figura 1. Extrações sequenciais de potássio (K) na camada de 0,0–0,20 m de um Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com fontes e doses de K_2O , após a safra da safra 2021/22 – início (A) e após a safra de milho 2024 (três anos de experimento).....63

CAPÍTULO II: OS REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO PODEM SUBSTITUIR O FERTILIZANTE KCL?

Figura 1. Valores de precipitação pluvial mensal e temperaturas máxima, mínima e média durante condução do experimento soja com sucessão milho nas safras 21/22 e 22/23.....75

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A UTILIZAÇÃO DE REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO

Tabela 1. Atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm após a colheita da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K_2O).....47

Tabela 2. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para o teor de cálcio (Ca) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....48

Tabela 3. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para o teor de magnésio (Mg) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....49

Tabela 4. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para a soma de bases (SB) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....49

Tabela 5. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....50

Tabela 6. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para Saturação por Bases (V%) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....51

Tabela 7. Teores de cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) do solo na camada de 0-20 cm após a colheita da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K ₂ O).....	52
---	----

Tabela 8. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para o teor de cobre (Cu) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....	53
--	----

Tabela 9. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para o teor de ferro (Fe) no solo na camada de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22.....	53
--	----

Tabela 10. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K ₂ O) para os atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm após a colheita do milho safra 2024.....	54
---	----

Tabela 11. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para o valor de pH no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024.....	55
--	----

Tabela 12. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K ₂ O) para os teores de cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) do solo na camada de 0-20 cm após a colheita do milho safra 2024.....	58
---	----

Tabela 13. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para os teores de cobre (Cu) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024.....	59
--	----

Tabela 14. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para os teores de manganês (Mn) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024.....	60
---	----

Tabela 15. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para os teores de ferro (Fe) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024.....	61
--	----

CAPÍTULO II: OS REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO PODEM SUBSTITUIR O FERTILIZANTE KCL?

Tabela 1. Altura de plantas, altura de inserção da 1ª vagem, número de vagens por planta, número de grãos por planta e produtividade da cultura da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K ₂ O).....	78
---	----

Tabela 2. Desdobramento da interação fontes com doses de potássio (K ₂ O) para a altura de plantas de soja safra 2021/22.....	80
---	----

Tabela 3. Concentrações de macronutrientes na cultura da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K ₂ O).....	81
Tabela 4. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para a concentração de nitrogênio (N) foliar para a cultura da soja safra 2021/22.....	82
Tabela 5. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para a concentração de fósforo (P) foliar para a cultura da soja safra 2021/22.....	83
Tabela 6. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura da soja safra 2021/22.....	84
Tabela 7. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para a concentração de cálcio (Ca) foliar para a cultura da soja safra 2021/22.....	85
Tabela 8. Concentração de micronutrientes na cultura da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K ₂ O).....	86
Tabela 9. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para a concentração de cálcio (Cu) foliar para a cultura da soja safra 2021/22.....	87
Tabela 10. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K ₂ O) para a concentração de zinco (Zn) foliar para a cultura da soja safra 2021/22.....	88
Tabela 11. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K ₂ O) para o valor SPAD, altura de plantas, tamanho de espigas, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e produtividade da cultura do milho safra 2022.....	89
Tabela 12. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para a altura de plantas do milho safra 2022.....	91
Tabela 13. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para tamanho da espiga do milho safra 2022.....	92
Tabela 14. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para o número de grãos por fileira do milho safra 2022.....	93
Tabela 15. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para o número de grãos por espiga do milho safra 2022.....	94
Tabela 16. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K ₂ O) para a produtividade de grãos do milho safra 2022.....	95

Tabela 17. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para as concentrações de macronutrientes na cultura do milho safra 2022.....	96
Tabela 18. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura do milho 2022.....	97
Tabela 19. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de magnésio (Mg) foliar para a cultura do milho safra 2022.....	98
Tabela 20. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para a concentração de micronutrientes na cultura do milho safra 2022.....	99
Tabela 21. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para tamanho da espiga do milho safra 2022.....	100
Tabela 22. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para o número de grãos por fileira do milho safra 2022.....	101
Tabela 23. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para o número de grãos por espiga do milho safra 2022.....	102
Tabela 24. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a produtividade de grãos do milho safra 2022.....	103
Tabela 25. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para a concentração de macronutrientes na cultura do milho safra 2022.....	104
Tabela 26. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura do milho 2022.....	105
Tabela 27. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de magnésio (Mg) foliar para a cultura do milho safra 2022.....	107
Tabela 28. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para a concentração de micronutrientes na cultura do milho safra 2022.....	108
Tabela 29. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para o valor SPAD, altura de plantas, tamanho de espigas, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e produtividade da cultura do milho safra 2023.....	109
Tabela 30. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para a concentração de macronutrientes na cultura do milho safra 2023.....	111

Tabela 31. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura do milho 2023.....113

Tabela 32. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de fósforo (P) foliar para a cultura do milho 2023.....114

Tabela 33. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para a concentração de micronutrientes na cultura do milho safra 2023.....116

Tabela 34. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de manganês (Mn) foliar para a cultura do milho 2023.....117

Tabela 35. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de ferro (Fe) foliar para a cultura do milho 2023.....119

RESUMO GERAL

ROSA, M. J. **Remineralizadores e KCl como fonte de potássio para a sucessão soja-milho**, 2025. 70f. (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

O potássio é o segundo nutriente mais absorvido pelas plantas e apresenta baixo efeito residual no solo devido à alta solubilidade do cloreto de potássio, fonte mais utilizada na agricultura. Neste contexto, objetivou-se avaliar o efeito de cinco doses e três fontes de potássio sobre os atributos químicos do solo, bem como sobre as características produtivas e nutricionais da soja e do milho, incluindo o efeito residual na cultura do milho de segunda safra, em Latossolo Vermelho distrófico. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) nas safras 2021/2022 e 2022/2023 para a soja e nas safras 2022 e 2023 para o milho. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 3, com quatro repetições, totalizando 60 unidades experimentais. Os tratamentos corresponderam a cinco doses de K_2O (0, 25, 50, 75 e 100% da dose recomendada de K_2O , sendo 0, 25, 50, 75 e 100 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O) e três fontes de K [cloreto de potássio (60% de K_2O), Fonolito (8% de K_2O ; 25% de Si) Fonolito Hidrotermalizado (12% de K_2O ; 25% de Si)]. Foram avaliados os atributos químicos e a dessorção de potássio do solo, as concentrações de macro e micronutrientes nas folhas diagnósticas, além dos componentes de produção e a produtividade de grãos. Os dados foram submetidos à análise de variância, para as doses de K aplicou-se regressão polinomial e, para as fontes de K, o teste de Tukey, utilizando o programa de análise estatística SISVAR. Para o Ca, os maiores teores foram obtidos com o uso do Fonolito e do Fonolito hidrotermalizado, que promoveram liberação gradual de nutrientes e melhoria na CTC. O teor de P não foi afetado pelas fontes ou doses, mantendo-se em teores adequados. O KCl elevou os teores de Cu e Zn, enquanto o Fonolito hidrotermalizado apresentou efeito mais equilibrado sobre os micronutrientes e estabilidade na liberação de Fe. A aplicação de fontes e doses de K_2O influenciou a disponibilidade de nutrientes e a produtividade das culturas. Na soja, o Fonolito hidrotermalizado destacou-se por manter maior produtividade sob déficit hídrico (safra 2021/22) e desempenho equivalente ao KCl em condições favoráveis (2022/23). Observou-se antagonismo entre K, Ca e Mg, sobretudo com KCl, enquanto o Fonolito hidrotermalizado reduziu esse efeito, garantindo melhor equilíbrio nutricional. No milho, as fontes de K_2O não diferiram significativamente, mas o fonolito apresentou leve vantagem em doses intermediárias. De modo geral, o Fonolito hidrotermalizado mostrou-se a fonte de K_2O mais

eficiente, proporcionando estabilidade química, equilíbrio nutricional e produtividade comparável ou superior ao KCl, configurando-se como alternativa sustentável na adubação potássica.

Palavras-chave: Dessorção de Potássio; Lixiviação de Potássio, Rochas potássicas.

GENERAL ABSTRACT

ROSA, M. J. **Remineralizers as a source of potassium for soybean-corn succession: soil and crop attributes.** 2025. 70f. (PhD in Agronomy) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

Potassium is the second most absorbed mineral nutrient by plants and presents low residual effect in the soil due to the high solubility of potassium chloride, the most used source in agriculture. In this context, the objective of this study was to evaluate the effect of five doses and three sources of potassium on the chemical attributes of the soil, as well as on the productive and nutritional characteristics of soybean and maize, including the residual effect on second-crop maize, in a dystrophic Red Latosol. The experiment was conducted at the Experimental Farm of Agricultural Sciences (FAECA) of the Federal University of Grande Dourados (UFGD) during the 2021/2022 and 2022/2023 seasons for soybean, and the 2022 and 2023 seasons for maize. A randomized block design was used, arranged in a 5×3 factorial scheme with four replications, totaling 60 experimental units. The treatments consisted of five K_2O doses (0, 25, 50, 75, and 100% of the recommended K_2O dose, corresponding to 0, 25, 50, 75, and 100 kg ha^{-1} of K_2O) and three K sources [potassium chloride (60% K_2O), phonolite (8% K_2O ; 25% Si), and hydrothermally treated phonolite (12% K_2O ; 25% Si)]. Soil chemical attributes and potassium desorption were evaluated, as well as macro- and micronutrient concentrations in diagnostic leaves, yield components, and grain productivity. Data were subjected to analysis of variance; polynomial regression was applied for K doses, and Tukey's test for K sources, using the SISVAR statistical software. For Ca, the highest levels were obtained with phonolite and hydrothermally treated phonolite, which promoted gradual nutrient release and improved cation exchange capacity. Phosphorus content was not affected by sources or doses, remaining within adequate levels. KCl increased Cu and Zn levels, whereas hydrothermally treated phonolite showed a more balanced effect on micronutrients and greater stability in Fe release. Application of K_2O sources and doses influenced nutrient availability and crop productivity. In soybean, hydrothermally treated phonolite stood out by maintaining higher yields under water deficit conditions (2021/22 season) and performance equivalent to KCl under favorable conditions (2022/23). Antagonism among K, Ca, and Mg was observed, especially with KCl, while hydrothermally treated phonolite reduced this effect, ensuring better nutritional balance. In maize, K_2O sources did not differ significantly, although phonolite showed a slight advantage at intermediate doses. Overall, hydrothermally treated phonolite proved to be the most efficient

K₂O source, providing chemical stability, nutritional balance, and productivity comparable to or greater than KCl, establishing itself as a sustainable alternative for potassium fertilization.

Keywords: Potassium desorption; Potassium leaching, Potassic rocks.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], o milho [*Zea mays* L.], o arroz e o algodão estão entre as principais culturas produzidas no Brasil (CONAB, 2023a). Dentre elas, a soja e o milho têm se destacado nas últimas décadas devido à expressiva expansão geográfica – especialmente na região Centro-Oeste – e à adoção contínua de inovações tecnológicas, fatores que impulsionaram significativamente o aumento da produção e da produtividade (Tisott; Schmidt, 2021). No caso da soja, essa expansão consolidou a cultura como a principal *commodity* do agronegócio brasileiro, movimentando diversos setores econômicos e contribuindo de forma relevante para a geração de renda e empregos. A região Centro-Oeste, em particular, tornou-se referência na produção do grão devido à sua adaptação ao Cerrado (Da Silva et al., 2023).

O aumento da produtividade agrícola no Brasil, observado nas últimas duas décadas, está diretamente relacionado à melhoria do manejo do solo, especialmente em regiões de solos altamente intemperizados. Esses solos apresentam baixa capacidade de troca de cátions (CTC), elevada acidez, altos níveis de alumínio trocável (Al^{3+}) e forte fixação de fósforo (P), além de limitações na disponibilidade de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Zn e Cu). Por isso, práticas como a correção da acidez e a adubação adequada são fundamentais para garantir altas produtividades (EMBRAPA, 2018).

Entre os nutrientes, o potássio (K) se destaca como o segundo elemento mais absorvido pelas plantas, desempenhando papel central na ativação enzimática, no controle da abertura e fechamento dos estômatos e na regulação do balanço hídrico e da fotossíntese (Marschner, 1995). Entretanto, as fontes solúveis de K, como o cloreto de potássio (KCl), principal fertilizante potássico utilizado no Brasil, apresentam elevada suscetibilidade à lixiviação, sobretudo em solos arenosos e com baixa CTC. Em média, cerca de 58% do K_2O presente no KCl é solúvel em água, o que explica as perdas significativas desse nutriente por lixiviação (Martinez et al., 2021). As perdas variam conforme fatores como intensidade de chuvas, dose aplicada, textura do solo e sua CTC, reforçando a importância da escolha adequada da fonte de K e do manejo nutricional (Melo et al., 2024).

Apesar de sua praticidade e baixo custo, o KCl mantém o Brasil fortemente dependente de importações. Entre 2021 e 2025, a volatilidade dos preços internacionais e a instabilidade das cadeias de suprimento evidenciaram a necessidade de alternativas mais seguras e sustentáveis. Nesse contexto, cresce o interesse por fontes alternativas de potássio, como sulfato de potássio, nitrato de potássio, silicato de potássio e remineralizadores, incluindo fonolitos e

outras rochas potássicas (ANDA, 2023; Soratto et al., 2013). Essas fontes podem apresentar menor solubilidade, liberação gradual do K e fornecimento adicional de nutrientes como Ca, Mg e o elemento benéfico Si, o que as torna promissoras em sistemas produtivos que buscam maior estabilidade e menor dependência externa.

Os remineralizadores de solo são materiais de origem rochosa moída que, aplicados ao solo, liberam gradualmente elementos essenciais ou não às plantas, promovendo a melhoria da fertilidade e contribuindo para processos de regeneração e sustentabilidade agrícola. Esses materiais atuam não apenas como fontes de macro e micronutrientes, mas também como condicionadores do solo, favorecendo a atividade biológica e a formação de agregados estáveis. De acordo com dados da FAO (2021), o uso de insumos de base mineral natural tem ganhado destaque mundial por integrar estratégias de manejo sustentável, reduzindo a dependência de fertilizantes altamente solúveis e contribuindo para sistemas agrícolas mais resilientes.

Entre os elementos presentes em algumas dessas fontes, destaca-se o silício (Si), reconhecido como elemento benéfico por contribuir para o fortalecimento das paredes celulares, aumento da resistência a pragas e doenças, redução do acamamento e maior tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos (Cassel et al., 2021). O uso de fertilizantes silicatados ou de rochas portadoras de Si e K pode, portanto, proporcionar benefícios simultâneos ao manejo nutricional e à resiliência das culturas.

Considerando a relevância agronômica do potássio, as limitações dos solos tropicais e a crescente busca por fontes alternativas mais sustentáveis, torna-se fundamental avaliar o comportamento dessas fontes no solo e suas respostas nas plantas. Diante do exposto, objetivou-se avaliar doses e fontes de K sobre os atributos químicos do solo, as características nutricionais e produtivas da soja e do milho, bem como o efeito residual na cultura do milho de segunda safra cultivado em Latossolo Vermelho distrófico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos econômicos das culturas da soja e do milho

No século XXI a prospecção do aumento da produção de alimentos é uma das principais questões a ser debatidas dentro do cenário mundial. As projeções da Organização das Nações Unidas já sinalizavam que a população global ultrapassaria de 9,5 bilhões de pessoas em 2050 e consequentemente o aumento na demanda mundial de alimentos, aumentos estes associados

a diversos outros desafios, como maiores rendas *per capita* e a crescente taxa de urbanização em especial nos países em desenvolvimento (Ferretto et al., 2024).

Mediante isso, o Brasil vem ganhando destaque global nas questões relacionadas ao desenvolvimento agrícola sustentável e aos programas de preservação ambiental, destacando-se como um dos principais produtores de alimentos do mundo e detentor de áreas de grande relevância para a conservação, que abrigam elevados níveis de biodiversidade e garantia da alimentação mundial (Quintam; Assunção, 2023).

De acordo com dados da CONAB (2024), a segunda previsão para a safra de grãos 2024/25 direciona para mais um crescimento significativo na produção agrícola brasileira, tanto em relação às áreas plantadas quanto às produções futuras, estabelecendo nova estimativa de recorde. A expectativa para a safra como um todo é de que sejam cultivados 81,4 milhões de hectares, o que representa aumento de 1,8% ou 1,46 milhão de hectares em comparação com a área plantada na safra 2023/24. Em 2025, conforme os levantamentos mais recentes: a Conab revisou a produção da safra 2024/25 para aproximadamente 330,3 milhões de toneladas, segundo o 7.º levantamento. Já para a safra 2025/26, o 2.º levantamento estima produção total de 354,8 milhões de toneladas, com área plantada de 84,4 milhões de hectares (alta de 3,3% sobre o ciclo anterior) e produtividade média projetada de 4.203 kg ha⁻¹.

Com a produção em nível mundial, é possível confirmar que “dentre os principais produtores mundiais de soja (Argentina, EUA e Brasil), o Brasil é o país que possui o maior potencial de expansão da área cultivada, podendo, a depender dos níveis de consumo do mercado do farelo e do óleo da soja, mais do que duplicar sua produção e, em curto prazo, se tornar o maior produtor e exportador mundial de soja e seus derivados. Observa-se que o país encabeça o ranking dos maiores produtores mundiais de soja, pois foram 156 milhões de toneladas do grão coletados na safra 2022/2023, representando 42% de toda a soja produzida mundialmente (Speltri et al., 2021).

Além disso, o Brasil caracteriza-se como um dos maiores exportadores mundiais de oleaginosas, cerca de, 98,5 milhões de toneladas foi a estimativa de exportação para 2023. Mas, foi em 2020 que o país se tornou o maior produtor de soja do mundo com 135,4 milhões de toneladas, em uma área de 38,5 milhões de hectares (Carvalho et al., 2023).

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura de grande importância no cenário financeiro mundial e brasileiro, devido ao seu uso diversificado, o que proporciona consequentemente elevada lucratividade com as exportações, seja na forma de grãos ou seus derivados (óleo e farelo de soja). Com isso, a soja se coloca como uma das maiores *commodities*

nacionais e é responsável pelo maior número de exportações de produtos agrícolas do Brasil (Trevisoli, 2018).

Nos últimos anos, a produção brasileira de soja aumentou, marcando um divisor de águas em uma série de mudanças sem precedentes na história da cadeia produtiva da soja que revolucionaram a agricultura brasileira. A soja contribuiu em grande parte para a mecanização e a melhoria das tecnologias das lavouras brasileiras, para a modernização dos sistemas agrícolas, para a expansão das fronteiras agrícolas, para a especialização e aumento do comércio internacional. Além de mudar e enriquecer a dieta brasileira, acelerando a urbanização do país e promovendo a interiorização da economia. A soja possibilitou a introdução de tecnologias importantes que auxiliou outras culturas, como o milho, bem como a promoção e descentralização da indústria agroindustrial nacional, patrocinando a expansão da suinocultura e avicultura (EMBRAPA, 2021).

No cenário econômico, o milho ocupa posição central entre as commodities agrícolas, sendo um dos grãos mais comercializados no mundo e com forte influência na formação de preços de cadeias produtivas associadas, como as de carnes, leite e biocombustíveis. A demanda global pelo cereal é sustentada principalmente pelos setores de ração animal, que consomem a maior parte da produção, e pela indústria de energia, especialmente na produção de etanol de milho, cujo crescimento tem ampliado a competitividade e a relevância estratégica do grão no mercado internacional (FAO, 2023; EMBRAPA, 2024).

No Brasil, o milho desempenha papel fundamental no equilíbrio econômico do agronegócio, integrando sistemas produtivos com a soja e viabilizando modelos de dupla safra que aumentam a eficiência do uso da terra e diluem custos de produção. A expansão da segunda safra consolidou o país como um dos principais produtores e exportadores mundiais do cereal, ampliando a participação brasileira no comércio global de grãos e fortalecendo a balança comercial do setor agrícola. Esse avanço está associado à adoção de tecnologias de manejo, melhoramento genético e intensificação dos sistemas de cultivo (CONAB, 2024; EMBRAPA, 2021).

Outro ponto relevante é que o preço do milho exerce efeito direto sobre os custos de produção das cadeias de proteína animal, influenciando a competitividade dos setores de suinocultura, avicultura e bovinocultura de corte e leite. Variações na oferta e na demanda do cereal, tanto no mercado interno quanto externo, refletem-se rapidamente nos preços de alimentos e insumos, tornando o milho um importante indicador econômico dentro do sistema agroindustrial. Além disso, a crescente industrialização do grão agrega valor à produção e

amplia as oportunidades de mercado, com impactos positivos sobre renda, geração de empregos e desenvolvimento regional (EMBRAPA, 2021; CONAB, 2024).

2.1.1 Cultura da soja

A cultura da soja, é conhecida há mais de 4.000 anos, originária do Extremo Oriente da Ásia e foi difundida por todos os continentes. Em meados do século XIX, foi implantada nos Estados Unidos e no final deste mesmo século na América do Sul, inicialmente na Argentina. No Brasil, ela foi introduzida em 1882, na Bahia, mas foi na década de 1950/60 que a soja teve a maior expansão a partir de incentivos direcionados pelo Governo Federal (Farias, 1985).

A soja é uma planta herbácea que está dentro da classe Magnoliópsida (isto é, dicotiledônea), na ordem Fabales, na família Fabaceae e no gênero *Glycine* L. Sendo uma planta com grande variabilidade genética, tanto no ciclo vegetativo e reprodutivo (Ritchie et al., 1982). Esta cultura possui grande variedade de ciclos, em que é possível encontrar no mercado cultivares com ciclos variáveis, entre 100 até 160 dias, podendo ser classificados em grupos de maturação precoce, semiprecoce, médio, semitardio e tardio, variando conforme as regiões. Os cultivares atualmente comercializados no Brasil têm seus ciclos em sua maioria entre 60 a 120 dias (Nunes, 2020).

Essa cultura é caracterizada por dias curtos, com cultivo adequado para áreas com latitudes maiores que 30° em regiões com clima temperado, entretanto o Brasil é uma exceção, já que as maiores áreas cultivadas com soja no país estão localizadas em regiões com latitudes abaixo dos 20°, a exemplo dos estados produtores como Centro-Oeste, Norte e Nordeste Brasileiros (Nunes, 2019).

A soja por ser uma cultura de clima temperado, oriunda da Ásia, mais precisamente no nordeste da China, a mesma, precisou passar por melhoramentos genéticos importantes para que sua introdução e produção em países de clima tropical seja eficiente, além disso, passou a ser a principal oleaginosa produzida e consumida no mundo, apresentando teores de óleo e de proteína nos grãos que podem ultrapassar 20 e 40%, respectivamente (Carvalho et al., 2023).

As suas sementes são muito valorizadas por ter composição única e por ser muito versátil, sendo usado desde alimentos para humanos, quanto para animais. Atualmente, a soja é importante fonte de óleo, o qual ainda pode ser transformado em diversos derivados como por exemplo, margarina, maionese, molho para saladas e até mesmo em biocombustíveis, além disso entre outras aplicações como fonte de proteínas para animais e humanos (Liu, 2016; Wang, 2025).

A cultura da soja é de grande importância econômica e social, sendo uma das principais *commodities* exportadas pelo Brasil. O cultivo requer condições ambientais específicas e manejos assertivos para alcançar produtividade máxima das variedades.

A cultura apresenta ciclo produtivo anual, podendo se adaptar a grande diversidade de solos e climas, representa mais da metade de toda a produção de plantas oleaginosas no mundo (Schmidt et al., 2020). Atualmente, essa *commodity*, tem se tornado alvo apreciado pelo mercado chinês, o que associado ao nível baixo do estoque do grão além de frustrações de safras anteriores no Brasil e mercados concorrentes, tem elevado os preços do grão a patamares jamais visto.

2.1.2 Cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais difundidas e mais antigas do mundo, sendo seu cultivo uma prática de grande relevância social e econômica para agricultores brasileiros, isto pode ser constatado quando se observa que este cereal é cultivado em todas as regiões do Brasil (Galindo et al., 2016; Skonieski et al., 2019; De Oliveira et al., 2024). É uma espécie nativa das américas e é uma cultura que se destacam em meio ao setor agropecuário (Toledo, 1980; Coelho, 2010; Da Silva et al., 2021), uma vez que, possui importante papel na alimentação animal e humana.

Mediante a botânica, o milho pertence a ordem Poales, família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribu Maydeae, gênero *Zea*, espécie *Zea mays* (Da Silva et al., 2021), nativas das Américas. Além dessas características, o milho é uma planta herbácea, anual e com ciclo de quatro a cinco meses, dependendo das variedades. Além do mais, o milho é uma planta monóica, possuindo flores femininas nas axilas das folhas (as espigas) e flores masculinas na parte superior (as panículas) (Toledo, 1980).

A cultura do milho, possui caule do tipo colmo, formado por nós e entrenós. Na parte superior do caule, as folhas encontram-se distribuídas de forma alternadas de um lado ao outro. E suas folhas são compostas por um limbo foliar largo, comprido e liso, gerando ângulo de 90° com o caule por uma resistente nervura principal (Moraes, 2012).

O mesmo, apresenta um sistema radicular próprio das gramíneas, sendo ele do tipo fasciculado, atingindo uma profundidade geralmente de 1,5 a 3,0 m de comprimento, localizado nas camadas mais superficiais entre 0,20 a 0,30 m e raízes tipo escoras, conhecidas como adventícias, ao qual auxiliam na fixação da planta e conseqüentemente ajudando na absorção dos nutrientes em solução e prevenindo o tombamento (Da Silva et al., 2021).

2.2 Fontes de fertilizantes contendo potássio

2.2.1 Cloreto de Potássio (KCl)

O K é um macronutriente, ou seja, absorvido em grande quantidade pelas plantas, sendo o cátion mais abundante nos tecidos vegetais (Veloso; Ferreira, 2023). Embora o K não seja encontrado diretamente em nenhuma estrutura vegetal ou molécula química, ele está envolvido em uma variedade de funções fisiológicas essenciais para o desenvolvimento vegetal, como por exemplo, o K é necessário para a atividade fotossintética, manutenção do turgor celular, regulação dos movimentos estomáticos, promoção da absorção de água, regulação da translocação de nutrientes na planta, estimulação do transporte e armazenamento de carboidratos, aumento da absorção de nitrogênio, promoção da síntese de proteínas e ainda participa da síntese de amido nas folhas (Abbas et al., 2020; Sardans; Peñuelas, 2021).

Neste sentido, o potássio influencia diretamente na qualidade e no desenvolvimento de vegetais aumentando a produção de biomassa, a área foliar e reduzindo a concentração de açúcar. A deficiência de potássio reduz a distribuição de assimilados via floema (Corrêa et al., 2018; Koch et al., 2020). A demanda por esse macronutriente pode ser atendida usando KCl, sulfato de potássio (K_2SO_4) e outras fontes naturais de potássio (El-Mogy et al., 2019).

Geralmente os agricultores fazem uso do cloreto de potássio (KCl) como principal fonte para fornecer K às plantas. Entretanto, o Brasil tem passado por momentos de escassez de KCl (Tonini, 2022, De Oliveira, 2014; Vieira et al., 2016). De fato, o KCl é uma fonte importante de K, com elevada solubilidade, o que faz com que haja liberação rápida do K para as culturas, bem como alta concentração de K, facilitando as operações como, logística e aplicação deste fertilizante. Contudo, o seu uso não equilibrado do mesmo, pode trazer consequências negativas aos sistemas agrícolas, como salinização e o acúmulo de cloro no solo (Carvalho; Kazama, 2013; Paula et al., 2020).

A salinização é um problema complicado dentro dos sistemas agrícolas, especialmente em áreas tropicais que apresentam mais de um ciclo de cultivo anual, o que acelera o processo de acúmulo de sais no solo. A salinização causa danos fisiológicos às sementes e às raízes das plantas, o que dificulta a absorção de água e nutrientes, especialmente em períodos de estiagem (Hassani et al., 2021; Fethi et al., 2023).

2.2.2 Fontes alternativas de fertilizantes

A busca por fontes nacionais de K, que vem se tornando cada vez mais importante, visa substituir, ao menos parcialmente, o potássio importado. Em face desse contexto, as rochas silicatadas ricas em potássio têm se mostrado uma fonte alternativa viável de K para algumas culturas, apresentando várias vantagens, como, por exemplo, ser uma fonte nacional, ter menor custo por K₂O equivalente, ausência de cloro, presença de outros elementos químicos, como quantidades relevantes de silício (Ribeiro et al., 2010; Soratto et al., 2021). E essas rochas podem inclusive atuar como condicionadores de solo, melhorando consequentemente suas propriedades químicas (Soratto et al., 2021). Além de ser uma alternativa de fonte de K aceita principalmente na agricultura orgânica, regenerativa e potencialmente menos agressiva à rizosfera microbiana do solo.

O fonolito é uma rocha caracterizada como ígnea, rica em concentrações de potássio. O seu desenvolvimento ocorreu com o resfriamento gradativo do magma, seguido por processos hidrotermais que modificam gradativamente suas características químicas e físicas. Este material é considerado valioso para a agricultura, pois tem a capacidade de enriquecer, remineralizar o solo e consequentemente fornecer nutrientes importantes para o desenvolvimento das plantas (Assunção et al., 2023).

Os fonolitos são compostos principalmente em feldspatos alcalinos, como a sanidina e a albita, mas também podem incluir outros minerais variados, como a biotita e a augita. A hidrotermalização desses materiais é um processo que envolve a circulação de águas quentes através de fissuras na rocha, causando mudanças que podem potencializar a solubilidade dos nutrientes, particularmente do potássio (Pedro, 2024).

Essa característica é particularmente benéfica para os agricultores que lidam com solos ácidos e com baixos níveis de potássio, pois o fonolito pode proporcionar uma solução prática para essa restrição, além de fornecer gradativamente o potássio. Ademais, pesquisas indicam que o fonolito tem potencial para auxiliar as plantas na resistência a estresses ambientais, tais como a escassez de água e a salinidade. Estes remineralizadores, ao favorecer esses nutrientes, possibilita que as plantas cresçam de forma mais saudável, mesmo sob condições adversas (Santos et al., 2020).

Um dos benefícios adicionais do fonolito hidrotermalizado é sua capacidade de aprimorar as estruturas do solo. Ele tem a habilidade de intensificar a agregação do solo, aumentando a porosidade e contribuindo com a retenção de umidade, fatores cruciais para o crescimento saudável da planta (Assunção et al., 2023).

Assim, o uso do remineralizador fonolito H. não só fornece nutrientes, mas também proporciona um ambiente mais propício para o desenvolvimento das plantas de maneira saudável e sustentável. Estudos feitos em várias culturas, incluindo milho e soja, sugerem que a utilização do fonolito pode resultar em melhorias consideráveis na biomassa, na produtividade e na qualidade dos grãos, além de aumentar a eficácia no uso da água (Aguiar et al., 2024).

2.3 Agricultura regenerativa

Agricultura regenerativa é um termo criado na década de 80 por Robert Rodale (fundador do instituto Rodale), com intuito de melhorar a sanidade e a qualidade dos solos utilizando medidas e técnicas orgânicas. Segundo Rodale (2014), a agricultura regenerativa é uma ótima alternativa para melhorar os recursos e prevenir a degradação e esgotamento dos mesmos, incentivando continuamente o avanço das inovações dentro das lavouras, com foco no bem-estar ambiental e socioeconômico do agronegócio (Mairink et al., 2025).

A agricultura regenerativa é descrita por Rhodes (2017) como um método com o objetivo de melhorar a saúde do solo e restaurar o ambiente geralmente altamente degradado, contribuindo consequentemente para sua produtividade. Evitando assim o esgotamento dos recursos naturais como o solo e a água, mantendo e conservando o ambiente sustentável para o cultivo de alimentos de qualidade.

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations) confirma que a prática da agricultura regenerativa, uma vez empregada no sistema produtivo, reabilita todo o ecossistema e aprimora os recursos naturais. além de, afirmar que há uma abordagem inclusiva dentro do agroecossistêmica, conservando a água, o solo e a biodiversidade em todos os níveis, consequentemente, melhorando a eficiência do uso dos insumos e dos serviços dentro dos sistemas agrícolas. Com essa abordagem, facilita alcançar a segurança alimentar e nutricional com opções economicamente viáveis e ecologicamente sustentáveis (Pearson, 2007).

De acordo com LaCanne e Lundgren (2018), a agricultura regenerativa é associada a cinco práticas, sendo elas: (1) Minimização do preparo do solo; (2) Eliminação do solo nu; (3) Promoção da diversidade de culturas; (4) Incentivo à infiltração de água no solo; e (5) Integração entre as operações de pecuária e cultivo. Essas práticas são sustentáveis e conservacionistas e têm alto potencial de acumular carbono orgânico no solo, aumentando a capacidade de retenção de água e nutrientes e, portanto, contribuindo para o sequestro de carbono atmosférico através de práticas naturais (Lobato, 2019).

Já Mendes et al. (2018) afirmaram que a saúde e qualidade do solo estão relacionadas diretamente à capacidade de fornecer serviços ambientais cruciais à vida, como produzir grãos, carne, fibras, dentre outros produtos de origem biológica; promover a saúde humana, vegetal e animal; armazenar e filtrar a água; atuar como dreno de carbono atmosférico; dentre tantos outros benefícios que um solo saudável e com qualidade pode proporcionar ao ecossistema.

Em relação aos manejos feitos no solo, como, práticas tradicionais tais como revolvimento do solo, uso de fungicidas, inseticidas, herbicidas e fertilizantes minerais de forma incorreta ou de forma muito intensiva podem comprometer a saúde do solo. Essas práticas podem expor os solos a processos de degradação, em risco ainda maior quando estão associadas à processos como erosão, compactação, perda acelerada da matéria orgânica e da estrutura do solo (Schoonover et al., 2015). De acordo com Bocaleti et al. (2021), um terço dos solos do mundo estão se encontrando em condições severas de degradação e quando considerados os solos agrícolas esse número aumenta para 40%. Isso se deve, principalmente à gestão, manejos e à utilização inadequadas dos mesmos.

Esses manejos inadequados interferiram diretamente nos processos de degradação do solo, além disso, com o passar do tempo desencadeou a conscientização do setor da produção agrícola. Isso, por consequência, promoveu a difusão de várias práticas mais sustentáveis, que consequentemente, demonstraram a possibilidade de conciliar produtividade competitiva com a adoção de práticas que resultem na saúde e qualidade do solo (Schoonover et al., 2015). Segundo Fajardo (2022), a qualidade do solo ainda depende de diversos desafios, tais como saúde do solo em geral, resiliência, equidade econômica, biodiversidade e muito mais, o que infelizmente não é uma solução fácil e de curto prazo, sendo assim a demanda de um conjunto complexo de tecnologias e práticas conservacionistas são de suma importância. Desse modo, a agricultura regenerativa vem se tornando importante e fundamental ferramenta para alcançar resultados positivos e progressivos nas áreas agrícolas, pastagens e florestas mundiais, tendo em sua principal características a responsabilidade de continuar melhorando o sistema agrícola e fazendo mais com menos, além de ter, como elemento-chave, o consenso de enxergar a saúde do solo como ponto central do manejo.

A agricultura, em níveis mundiais, configura-se como ferramenta fundamental para a subsistência da população humana, e há necessidade de se produzir mais, acompanhando o crescimento populacional mundial. Entretanto, sua intensificação e expansão de forma desordenada podem afetar de maneira negativa os ecossistemas, os conduzindo a processos de degradação e escassez dos recursos naturais. Mediante tais fatos, o uso de insumos biológicos

de forma complementar ou substitutiva aos insumos sintéticos e químicos, vem se tornando como principal ferramenta para a recuperação e a manutenção do ecossistema produtivo, construindo base sustentável e de grande importância para o crescimento e desenvolvimento da agropecuária mundial (García et al., 2015).

Segundo Pinotti & Santos (2013), a agricultura ainda tem como principal objetivo aumentar a produção de alimentos, mas mediante isso, ainda temos vários desafios como o uso em larga escala de insumos químicos, que vem provocando vários impactos ao meio ambiente. Como alternativa à utilização dessas práticas de baixa sustentabilidade, o uso de insumos alternativos biológicos vem ganhando espaço e possibilitando traçar caminhos de transformação, visando à conservação sustentável dos recursos naturais e do próprio planeta, colaborando com a sustentabilidade e a qualidade dentro da produção de alimentos.

Com a nova era biotecnológica que vem se desenvolvendo no agronegócio, emerge também uma nova perspectiva importante no desenvolvimento do agronegócio brasileiro, valorizando cada vez mais os modelos sustentáveis de produção. O Brasil encontra-se na vanguarda dessa terceira onda do agronegócio, pois tem alto potencial territorial, tecnológico, metodológicos, profissionais cada vez mais qualificados, capazes de promover o início desse desenvolvimento promissor (Vidal et al., 2021). Neste contexto, o Programa Nacional de Bioinsumos debate, o qual tem por finalidade ampliar e fortalecer a utilização de bioinsumos no País para beneficiar o setor agropecuário, sendo coordenado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2020).

3. HIPÓTESE

Em solos com teores de potássio de adequado a alto, fontes remineralizadoras podem substituir o KCl como fertilizante potássico, mantendo a produtividade das culturas da soja e do milho, além de promoverem melhorias nos atributos químicos do solo.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. *Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2023*. São Paulo: ANDA, 2023. Disponível em: <https://anda.org.br>. Acesso em: 27 out. 2025.

AGUIAR, B. G. Eficiência agrônômica de remineralizadores no cultivo de milho em sistema de manejo orgânico e potencial de solubilização de K por ácidos orgânicos. 2024. 97 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024. Disponível: <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/20241>.

ABBAS, S.; JAVED, M. T.; SHAHID, M.; HUSSAIN, I.; HAIDER, M. Z.; CHAUDHARY, H. J., MAQSOOD, A. (2020). *Acinetobacter* sp. SG-5 inoculation alleviates cadmium toxicity in differentially Cd tolerant maize cultivars as deciphered by improved physio-biochemical attributes, antioxidants and nutrient physiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, 155, 815-827, 2020. Disponível: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S098194282030406X>>.

ASSUNÇÃO, R. D. D.; CASSOL, P. C.; GRANADOS, S. B.; MAFRA, Á. L.; BITTENCOURT, R. F. D. M. Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(2), e275193. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Programa Nacional de Bioinsumos. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/bioinsumos>. Acesso em: 27 out. 2025.

BICA, L. M.; NEGROMONTE, I. V.; IACIA, J. C.; FOREST, R.; RODRIGUES, A. T.; AMADORI, A. H. Tipos de cobertura vegetal utilizadas no milho segunda safra em sistema de plantio direto (SPD) do Mato Grosso do Sul. *Revista Magsul de Agronomia*, 2022. Chaves et al., 2022. Disponível: <https://magsulnet.magsulms.com.br/revista/index.php/rma/article/view/81>.

BOCALETI, L. H. R.; GASPAROTTO, F.; PARIZ, S.; SCHMIDT FILHO, E.; PACCOLA, E. A. S. Sustentabilidade agrícola e saúde do solo. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 5, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://cienciasambientais.com/index.php/rica/article/view/5607>.

CARVALHO, L.C.; KAZAMA, E.H. Efeito da salinidade de cloreto de potássio (KCL) na germinação de sementes e crescimento de plântulas de pepino (*Cucumis sativus* L.). Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, v.7, p. 429-435, 2011.

CARVALHO, N.; RODRIGUES, E.; SANTANA, T.; CATANHEDE, L.; SOUSA, G.; SOUSA, R.; SILVA FILHO, F. M.; SILVA-MATOS, R. R. S. Revisão: a importância da soja para o agronegócio brasileiro. Editora Atena: Fitotecnia, sistemas agrícolas ambientais e solo, cap. 6, 2023. DOI: 10.22533/at.ed.6252331036. Disponível em: https://cdn.atenaeditora.com.br/atenaeditora/artigos_anexos/202304/yNF3uwkfoZzcmtupvKBQfKUATgoTMI7dlzd7R7QN.pdf.

CASSEL, J. L.; GYSI, T.; ROTHER, G. M.; PIMENTA, B. D.; LUDWIG, R. L.; DOS SANTOS, D. B. Benefícios da aplicação de silício em plantas. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 4(4), 2021. 6601-6615. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/41883>.

COELHO, A. M. A. Implantação da cultura do sorgo. Sistema de Produção, 2 (6a ed.). Embrapa Milho e Sorgo. 2010. ISSN 1679-012X Versão Eletrônica. Disponível em: https://www.google.com/goto?url=CAESdgHrOzAV7KtZ79gHUZHJ8ivy6UaUaYLfYURqalX2uvi-HCoUXZCoAqurVwoBC7omGz_ESIAh4jzX_hGOtR_xFMbXG1Kv_R6PCjFP9TR0L8hLWpZ8MOg960pVx88nljrOxiGbpcRYA46AAHha1k7iq0y5zBiKZpY.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONABa). Acompanhamento da safra brasileira grãos – Safra 2019/2020 – Primeiro levantamento, Brasília, v.7, n.1, p.1-144. Outubro 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 26 set. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONABb). Acompanhamento da safra brasileira grãos – Safra 2019/2020 – Décimo primeiro levantamento, Brasília, v.7, n.11, p.1-66. Agosto 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 26 set. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONABc) Acompanhamento da safra brasileira de grãos: v. 7 - Safra 2019/2020, n. 12 - Décimo segundo levantamento, setembro 2020a. Brasília: CONAB, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 27 out. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONABa). Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2022/2023. 6º Levantamento [S. l.],. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONABb). Acompanhamento da Safra brasileira 2023/2024. Safra de Grãos, 9º Levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 14 jun. 2024

CONAB. *Levantamento de Safra de Grãos – 7º Levantamento (safra 2024/25)*. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, abril de 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/7o-levantamento-safra-2024-25> .

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos>.

CORRÊA, C. V.; GOUVEIA, A. M. S.; MARTINS, B. N. M.; LANNA, N. B. L.; TAVARES, A. E. B.; MENDONÇA, V. Z.; JORGE, L. G.; CARDOSO A. I. I.; EVANGELISTA, R. M. Effect of top-dressed potassium fertilization on the yield and quality of cucumber. *Journal of Plant Nutrition* 41:1345–50.2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/da5e248b-cb87-4d7d-8bb9-051f0cd2994a/content>.

DA SILVA, D. F.; DE MELO GARCIA, P. H.; DE LIMA SANTOS, G. C.; DE FARIAS, I. M. S. C.; DE PÁDUA, G. V. G.; PEREIRA, P. H. B.; CABRAL, A. M. D. Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 3, p. e12310313172-e12310313172, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/download/13172/11808/172335>.

LIVEIRA, G. R. de; AFFÉRRI, F. S.; PELUZIO, J. M.; CARMASSI, A. L.; PEGUIN, L. H. de L.; MEIRA, O. D. C. de. Produtividade e retorno econômico sob doses de nitrogênio em lavoura de milho irrigado. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, [S. l.], v. 22, n. 10, p. e7501, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n10-264. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/7501>. Acesso em: 16 mar. 2026.

DIAS, V. S. Agricultura regenerativa: estudo de caso em lavoura comercial de soja no município de Rosário do Sul, Rio Grande do Sul. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30238>.

EL-MOGY, M. M.; SALAMA, A. M.; MOHAMED, H. F.; ABDELGAWAD, K. F.; ABDELDAYM, E. A. 2019. Responding of long green pepper plants to different sources of foliar potassium fertiliser. *Agriculture*, v. 65, p. 59-76. DOI: 10.2478/agri-2019-0007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334699047_Responding_of_Long_Green_Pepper_Plants_to_Different_Sources_of_Foliar_Potassium_Fertiliser.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Dados econômicos 2021– soja. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 30/04/2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação. 353p. 2018.

EMBRAPA — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Milho: sistemas de produção e importância econômica. Brasília: EMBRAPA, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agropensa/agro-em-dados/agricultura/graos>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION of the United Nations. The role of natural mineral inputs in sustainable soil management. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 25 nov. 2025.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. The role of regenerative agriculture in restoring ecosystems and enhancing natural resources. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/regenerative-agriculture>. Acesso em: 27 out. 2025.

FAO — Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT: Crops and livestock products. Rome: FAO, 2023.

FAGUNDES, M. B. B., & SIQUEIRA, R. P. (2015). Caracterização do sistema agroindustrial da soja em Mato Grosso do Sul. *Revista De Política Agrícola*, 22(3), 58–72. Recuperado de <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/768>.

FAJARDO, A. Além de neutra em relação ao clima, a agricultura pode ser regenerativa. *AgroANALYSIS*, v. 42, n. 6, p. 36-37, 2022. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/agroanalysis/article/download/88083/82817>.

FARIAS, A. D. de; DO SUL, EMATER Rio Grande. Soja: 1985 - Documento 1: Histórico, evolução, situação. 1985.

FERRETTO, LUANA RODRIGUES; DE CAMARGO LOPES, REINALDO; KINDLEIN, LÍRIS. Alimentando um mundo em crescimento: uma jornada científica sobre a tríade sustentabilidade, alimentos e as percepções do consumidor. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 41, p. 27393, 2024. Disponível em: https://apct.sede.embrapa.br/cct/pt_BR/article/view/27393.

FETHI, M.; FAOUZI, Z.; MOHAMED, D.; SOFIANE, L.; MEI-LING, H. C. Effect of a hyperarid climate on groundwater salinity: A case study of the Ouargla shallow aquifer (Northern Sahara, Algeria). *Archives of Environmental Protection*, v. 49, n.7, p. 70-79, 2023. Disponível em: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-96496798-35e7-45db-9a2b-e652c0c407f9>.

DA SILVA, D. F., DE MELO GARCIA, P. H., DE LIMA SANTOS, G. C., DE FARIAS, I. M. S. C., DE PÁDUA, G. V. G., PEREIRA, P. H. B., ... & CABRAL, A. M. D. (2021). Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. *Research, Society and Development*, 10(3), e12310313172-e12310313172. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/13172>.

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; SANTINI, J. M. K.; ALVES, C. J.; NOGUEIRA, L. M.; BELLOTTE, J. L. M. Corn yield and foliar diagnosis affected by nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n.40, p.1-18, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304609542_Corn_Yield_and_Foliar_Diagnosis_Affected_by_Nitrogen_Fertilization_and_Inoculation_with_Azospirillum_brasilense. Acesso em: 03 maio 2022.

HASSANI, A.; AZAPAGIC, A.; SHOKRI, Climate change and primary soil salinization: A global scale perspective for the 21st century. *Nature Communications*, v. 12, p. 1-17 n. 6663. 2021. DOI:10.1038/s41467-021-26907-3. Disponível em:

<https://research.manchester.ac.uk/en/publications/climate-change-and-primary-soil-salinization-a-global-scale-persp/>.

LACANNE, C. E.; LUNDGREN, J. G. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. PeerJ, v. 6, e4428, 2018. Disponível em: <https://peerj.com/articles/4428/?td=tw>.

LIU, K. Soybeans: Chemistry, Technology, and Utilization. Springer, 2016. Disponível em: <https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=SynoBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=LIU,+K.+Soybeans:+Chemistry,+Technology,+and+Utilization.+Springer,+2016.&ots=0IQBk3yVuX&sig=XIz2PXpEGlKxkNYoJJ06ZZIESjM>.

LOBATO, B. Agricultura conservacionista: conheça os preceitos e práticas para o Cerrado. 2019. Transferência de Tecnologia. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/48440960/agricultura-conservacionistaconheca-os-preceitos-e-praticas-para-o-cerrado>> . Acesso em nov de 2022

MAIRINK, T. C. P., DA FONSECA, F. L., RIGHI, E., BULHÕES, F. M., ANTUNES, L. E. G., & DE AGUIAR JÚNIOR, L. V. (2025). A importância da agricultura regenerativa no Brasil. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 23(7), 42. 2025. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10450270>.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889p. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19950708651>.

MARTINEZ, H. E. P.; MAROTTA, J. J. L.; MANGAS, I. B. Relações solo-planta: Bases para a nutrição e produção vegetal. Editora UFV, 2021. 307p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=RJYvEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT142&dq=MARTINEZ,+H.+E.+P.%3B+MAROTTA,+J.+J.+L.%3B+MANGAS,+I.+B.+Rela%C3%A7%C3%B5es+solo-planta:+Bases+para+a+nutri%C3%A7%C3%A3o+e+produ%C3%A7%C3%A3o+vegetal.+Editora+UFV,+2021.+307p.&ots=PNLNVsjeXh&sig=ZEUMl8GydNF7nFqClRzJchkjSaA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

MENDES, I. D. C., DE SOUSA, D. M. G., DOS REIS JUNIOR, F. B., LOPES, A. D. C., & LOPES, A. A. D. C. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Embrapa

Cerrados. Circular Técnica, 38. 2018. 23p. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-1110832/Description>.

MORAIS, T. P. D. Adubação nitrogenada e inoculação com *Azospirillum brasilense* em híbridos de milho. Dissertação (Mestrado em Agronomia) –Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Agronomia, Uberlândia. 82 f. 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/12160>.

MELO, T. V. D.; NUNES, M. C. M.; MARTINS FILHO, E. M. S.; CADONÁ, E. A.; CARLOS, F. S.; MIGUEL, P. Perda de nitrogênio, fósforo e potássio via escoamento superficial sob chuva simulada em diferentes sistemas de manejo de solo. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 29, e20230071. 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/PYDx3jvpqRt5RDsr3zxzmNh/abstract/?format=html&lang=pt>.

NUNES, J. L. da S. Características da soja. Agrolink, 2020. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/informacoes/caracteristicas_361509.html. Acesso em: 01 jan. 2024. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/informacoes/caracteristicas_361509.html.

NUNES, Y. C. R. Experiência prática na cadeia produtiva da soja em Sambaíba/MA. 2019. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3283/2/YaraCRN_REL.pdf.

OLIVEIRA, J. T. L.; CAMPOS, V. B.; CHAVES, L. H. G.; GUEDES FILHO, D. H. Crescimento de cultivares de girassol ornamental influenciado por doses de silício no solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 2, p. 123–128, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/fJ4KWPprZwdKfQL7gGPm3Kf/?format=html&lang=pt>.

OLIVEIRA, S.; LEMES, E.S.; MENEGHELLO, G.E.; TAVARES, L.C.; BARROS, A.C.S.A. Aplicação de silício via solo no rendimento e na qualidade fisiológica de sementes de soja. Semina: Ciências Agrárias, v. 36, p. 3029-3042, 2015. Disponível em <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/vti-22885>.

PAULA, R. H. R.; ANJOS, D. D. N.; FREITAS, P. H. G.; RIBEIRO, J. S. Efeito da salinidade do cloreto de potássio na emergência e no crescimento inicial de plântulas de soja. Revista PesquisAgro, v.3, n. 1, p. 110-117, 2020. Disponível em: <https://periodicos.cfs.ifmt.edu.br/periodicos/index.php/agro/article/view/120>.

PEARSON, C. J. Regenerative, semiclosed systems: a priority for twenty-first-century agriculture. *BioScience*, v. 57, n. 5, p. 409-418, 2007. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article-abstract/57/5/409/221738>.

DA SILVA, J. H. B.; SILVA, A. V. da; SILVA, C. M.; GOMES, T. R. V. R. Uso de bioestimulantes na cultura do milho (*Zea mays* L.): uma revisão. *Scientific Electronic Archives*, v. 16, n. 5, 2023. DOI: 10.36560/16520231664. PEDRO, G. V. V. Épocas de aplicação e doses alternativas de potássio na cultura do algodão no Cerrado. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370416051_Uso_de_bioestimulantes_na_cultura_do_milho_Zea_mays_L_uma_revisao.

PINOTTI, M. M. Z.; SANTOS, J. C. P. Dos primórdios da agricultura ao controle biológico em plantas: um pouco de história. *Ciência Rural*, v. 43, n. 10, p. 1797-1803, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/ShHMF9JTtNrJxDSbhLnN9Nm/abstract/?lang=pt&format=html>.

GARCÍA O. J.; PUENTE, E. O. R.; HOYOS J. M. B.; ELÍAS J. L.; AMADOR B. M.; MONTIEL L. G. H.; MARTINEZ A. Los fertilizantes biológicos en la agricultura. *Invurnus, Agricultural and Food Sciences, Environmental Science*. 10, n. 1, p. 10-17, 2015. Disponível em: <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/632>.

QUINTAM, C. P. R.; DE ASSUNÇÃO, G. M. Perspectivas e desafios do agronegócio brasileiro frente ao mercado internacional. *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218*, v. 4, n. 7, p. e473641-e473641, 2023. Disponível em: https://recima21.com.br/recima21/pt_BR/article/view/3641.

RODALE, R. *The New Organic Grower: a master's manual of tools and techniques for the home and market gardener*. Emmaus: Rodale Press, 2014. Disponível em: <https://rodaleinstitute.org/>.

RHODES, C.J. The Imperative for Regenerative Agriculture. *Science Progress*, 100, 80-129. <https://doi.org/10.3184/003685017x14876775256165>. 2017. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3863400>.

RIBEIRO, L. S.; SANTOS, A. R.; SOUZA, L. F. S.; SOUZA, J. S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34 (3), 891-897. (2010). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/bJWdVFtntC9gHHNsqw3wWfP/?lang=pt>.

RITCHIE, S.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E. *How a soybean plant develops*. Ames, Yowa: Yowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension, 1982. 20 p.

(Special Report, n. 53). Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1356372>.

SANTOS, F. F. et al. Fonolitos como remineralizadores do solo: efeitos na resistência das plantas a estresses ambientais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, e0190080, 2020.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. *Plants*, v. 10, n. 2, p. 419, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/419>.

SCHMIDT, C. A. P.; TAYANO, P. D.; DOS SANTOS, J. A. A.; MARUJO, L.; DE PROENÇA, G. G. Previsões estatísticas com base em séries temporais da cultura da soja no Brasil. *Revista Técnico-Científica*, n. 24, 2020. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/698>.

SCHOONOVER, J. E.; CRIM, J. F. An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed anagement. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, v. 154, n. 1, p. 21-47, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280912798_An_Introduction_to_Soil_Concepts_and_the_Role_of_Soils_in_Watershed_Management.

SKONIESKI, F. R.; VIÉGAS, J.; MARTIN, T. N.; MINGOTTI, C. C. A.; NAETZOLD, S.; TONIN, T. J.; DOTTO, L. R.; MEINERZ, G. R. Effect of nitrogen topdressing fertilization and inoculation of seeds with *Azospirillum brasilense* on corn yield and agronomic characteristics. *Agronomy*, v.9, n.812, p.1-11, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4395/9/12/812>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.56, n. e02686, 10 p., 2021b. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02686>. (b). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/SSMbJTjcdkqPDdbGj6CsPyn/?format=html&lang=en>.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; CAMPOS, M. de; COSTA, C.H.M. da; GILABEL, A.P.; CASTRO, G.S.A.; FERRARI NETO, J. Silicate rocks as an alternative potassium fertilizer for upland rice and common bean crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.56, e01411, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01411>. (a). Disponível em : <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1135684/1/5970.pdf>.

SPELTRI, N. F. B. Revelando o potencial de biocontrole de fitopatógenos da soja (*Glycine max*. L) por seus endofíticos. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura -Ciências

Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/d3bfde8f-b18f-4605-b6d1-6de291999507/download>.

TISOTT, S. T.; SCHMIDT, V. Expansion and intensification of agricultural crops in the Cerrado Biome in the Center-West Region of Brazil. *Brazilian Journal of Business*, 3(3), 2280–2294. 2021. <https://doi.org/10.34140/bjbv3n3-020>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJB/article/view/33857>.

TOLEDO, F. D. Tecnologia das sementes. Melhoramento e produção do milho. Campinas: Fundação Cargill, 1980. 571-619. Disponível em: <https://fundacaocargill.org.br/acervo-digital/melhoramento-e-producao-do-milho/>.

TONINI, M. M.; MOREIRA, P. A.; OLIVEIRA, F. D. M.; GUALBERTO, R.; SPERS, R. C.; GAION, L. A. Efeitos de diferentes fontes de potássio no crescimento da soja. *Revista Unimar Ciências*, 2022. Disponível em: <https://ojs.unimar.br/index.php/ciencias/article/view/1732/1059>.

TREVISOLI, T. R. Aplicação de espectroscopia de infravermelho próximo para classificação de amostras de farelo de soja. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado em Inovações Tecnológicas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2008. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4121?mode=full>.

VELOSO, A.; FERREIRA M. E. Potássio na cultura da batata-doce. Boletim técnico n.º 17, +BDMIRA. [https:// BDMIRA/images/desdobraveis/Folheto17.pdf](https://BDMIRA/images/desdobraveis/Folheto17.pdf). 2023.

VIDAL, M. C.; AMARAL, D. F. S.; NOGUEIRA, J. D.; MAZZARO, M. A. T.; LIRA, V. M. C. Bioinsumos: a construção de um Programa Nacional pela Sustentabilidade do Agro Brasileiro. *Economic Analysis of Law Review*, v. 12, n. 3, p. 557-574, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1140283/bioinsumos-a-construcao-de-um-programa-nacional-pela-sustentabilidade-do-agro-brasileiro>.

WANG, Z., GUO, Y., WANG, S., XIE, L., LU, Q., & WANG, X. Effect of steam explosion pretreatment on the aqueous extraction efficiency of soybean oil. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2025, 104, 104080. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146685642500164X>.

CAPÍTULO I:

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A UTILIZAÇÃO DE REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO

RESUMO

O uso de remineralizadores de solo apresenta potencial promissor para substituir parcial ou totalmente os fertilizantes minerais convencionais, reduzindo a dependência de insumos importados, os custos de produção e promovendo a sustentabilidade e revitalização do solo. Mediante a essas informações, objetivou-se avaliar cinco doses e três fontes de potássio quanto aos efeitos nos atributos químicos e a dessorção de potássio do solo, bem como seu efeito residual na cultura do milho de segunda safra em Latossolo Vermelho distrófico. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) nas safras 2021/2022 e 2022/2023 para a soja e nas safras 2022, 2023 e 2024 para o milho. Amostras de solos foram coletadas na camada de 0-20 cm no início do experimento (após a safra da soja 2021/2022) e após a safra de milho 2024, correspondendo a três anos de condução. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 3, com 15 tratamentos e 4 repetições, totalizando 60 unidades experimentais. Foram avaliadas cinco doses de K_2O (0, 25, 50, 75 e 100% da dose recomendada de K_2O , correspondendo a 0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O) com três fontes de K [cloreto de potássio (60% de K_2O), Fonolito (8% de K_2O /25% de Si) e Fonolito Hidrotermalizado (12% de K_2O /25% de Si)]. Os dados foram submetidos à análise de variância, para as doses de K aplicou-se regressão polinomial, e para as fontes de K foi aplicado o teste de Tukey, utilizando o programa de análise estatística SISVAR. As fontes de K_2O influenciaram significativamente a maioria dos atributos químicos do solo (Ca, Mg, SB, CTC, V%, Cu, Fe e Mn), sem efeitos sobre P e Zn. O KCl proporcionou aumentos imediatos e lineares nos teores de K, mas com efeito limitado na estabilidade de Ca e Mg. Em contraste, os remineralizadores (Fonolito e Fonolito H.) promoveram melhoria gradual e sustentável da fertilidade do solo. O Fonolito H. destacou-se por aumentar a CTC e a saturação por bases (V%), indicando maior potencial de correção e estabilidade do solo a longo prazo, com liberação lenta e contínua de K e cátions. A resposta de Cu, Fe e Mn foi modulada pelo pH e saturação de bases promovidos pelos remineralizadores. Conclui-se que o KCl é mais eficiente para o fornecimento de K a curto prazo, devido à sua alta solubilidade, enquanto os remineralizadores apresentam maior eficiência a longo prazo, contribuindo para a liberação gradual de nutrientes e a estabilidade dos cátions, configurando-se como alternativa sustentável na adubação potássica.

Palavras-chave: Agricultura regenerativa; Cloreto de potássio; Fonolito.

CHAPTER I:

SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES WITH THE USE OF REMINERALIZERS AS A POTASSIUM SOURCE

ABSTRACT

The use of soil remineralizers shows promising potential to substitute or minimize the use of chemical mineral fertilizers, consequently reducing dependence on imported inputs, lowering production costs, and promoting sustainable soil revitalization. Given this information, the objective was to study 5 doses and 3 sources of potassium for soil chemical attributes and potassium desorption, and their residual effect on the second-crop maize in a Dystrophic Red Latosol. The experiment was conducted at the Experimental Farm of Agricultural Sciences (FAECA) of the Federal University of Grande Dourados (UFGD) during the 2021/2022 and 2022/2023 growing seasons for soybean and the 2022, 2023, and 2024 seasons for maize. At the beginning of the experiment after the 2021/2022 soybean harvest and after the 2024 maize harvest (three years of experiment conduction), soil samples were collected from the 0–20 cm layer to determine soil chemical attributes and the potassium desorption capacity. The experimental design was a randomized block design in a 5×3 factorial scheme, with 15 treatments and 4 replications, totaling 60 experimental units, which were: 5 doses of K₂O (0,25,50,75, and 100% of the recommended K₂O dose, corresponding to 0,25,50,75, and 100 kg ha⁻¹ of K₂O) combined with 3 sources of K [potassium chloride (KCl, 60% of K₂O), Phonolite (8% of K₂O/25% of Si), and Hydrothermalized Phonolite (12% of K₂O/25% of Si)]. Soil chemical attributes and the soil potassium desorption capacity were evaluated. The results were analyzed using analysis of variance. Polynomial regression was applied for the K doses, and Tukey's test was applied for the effect of K sources, using the SISVAR statistical analysis software. The K₂O sources had significant effects on most chemical attributes (Ca, Mg, SB (Sum of Bases), CEC (Cation Exchange Capacity), V% (Base Saturation), Cu, Fe, and Mn) but did not influence P and Zn. KCl provided an immediate and linear increase in K contents, but had a limited effect on the stability of Ca and Mg. In contrast, the remineralizers (Phonolite and Hydrothermalized Phonolite) promoted a gradual and sustainable improvement in fertility. The Hydrothermalized Phonolite stood out by increasing the CEC and base saturation (V%), indicating a greater potential for long-term soil correction and stability, with slow and continuous release of K and cations. The response of Cu, Fe, and Mn was modulated by the pH and base saturation promoted by the remineralizers. It is concluded that KCl is more efficient for short-term K supply due to its high solubility. However, the use of remineralizers is essential for the gradual and sustained supply of K and other nutrients, representing a superior strategy for long-term improvement of soil chemical fertility and cation stability.

Key-words: Regenerative agriculture; Potassium chloride; Phonolite.

INTRODUÇÃO

O Brasil, um dos principais países produtores mundiais de alimentos, apresenta alta dependência de insumos importados para a produção agrícola, principalmente de fertilizantes. Em 2021, cerca de 85% dos fertilizantes utilizados no país foram oriundos da importação, confirmando a forte dependência externa (ANDA, 2022). Essa situação se manteve nos anos

seguintes e, em 2025, o país registrou novo recorde nas importações, com aproximadamente 4,79 milhões de toneladas de fertilizantes importadas apenas no mês de julho, representando aumento de cerca de 7% em relação ao mesmo período de 2024 (DATAGRO, 2025). Essa dependência e a constante oscilação dos preços e da disponibilidade desses insumos afetam diretamente a estabilidade e a competitividade da produção agrícola nacional.

No ano de 2021, a produção brasileira foi responsável por apenas 6,99 milhões de toneladas de fertilizantes, volume entregue ao mercado de 45,85 milhões de toneladas. Com a alta demanda da safra, fez-se necessária a importação de 39,20 milhões de toneladas, resultando em estoque de 7,27 milhões de toneladas para o ano de 2021. Nesse período, foram entregues 12,38% a mais de fertilizantes em relação a 2020 (ANDA, 2022).

Entre janeiro e maio de 2025, as entregas acumuladas de fertilizantes ao mercado brasileiro totalizaram 15,83 milhões de toneladas, representando um crescimento de 11,4% em relação a 2024. A produção nacional atingiu 2,91 milhões de toneladas, enquanto as importações somaram 14,92 milhões de toneladas, um aumento de 13,9% (ANDA, 2025). Esses dados refletem a crescente demanda interna e a dependência contínua do Brasil em relação a fertilizantes importados.

Em 2025, os dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) mostram recuperação significativa do setor. No acumulado de janeiro a maio de 2025, as entregas ao mercado brasileiro totalizaram 15,83 milhões de toneladas, representando crescimento de 11,4% em relação ao mesmo período de 2024. A produção nacional de fertilizantes intermediários somou 2,91 milhões de toneladas, registrando também alta de 11,4%, enquanto as importações alcançaram 14,92 milhões de toneladas, aumento de 13,9% sobre o mesmo período do ano anterior (ANDA, 2025). Esses resultados reforçam o aumento da demanda interna e a manutenção da alta dependência de insumos importados, que continua sendo um dos principais desafios do agronegócio brasileiro.

O mercado mundial de fertilizantes, que já enfrentava consecutivos e fortes aumentos nos preços ao longo de 2021, ficou ainda mais apreensivo a partir de março de 2022, tendo em vista o conflito no leste europeu, região que é uma das maiores fornecedoras globais de fertilizantes e de gás natural. Mediante tais fatos, pode-se confirmar a dependência nacional de fertilizantes estrangeiros, ficando cada vez mais evidente quando a União Europeia (UE) impôs sanção econômica sobre Belarus e impediu parcialmente a exportação do fertilizante potássico por meio dos países membros da UE no ano de 2021. Com a guerra entre a Rússia e a Ucrânia,

a UE impôs sanção econômica ao país russo, o que deve limitar ainda mais a oferta desse fertilizante para o mundo (Vos R. et al., 2025).

Diante desse cenário, os estudos com fontes alternativas de potássio são considerados uma estratégia importante para o uso agrícola, devido principalmente ao aumento constante da produção agrícola e à direta dependência da importação de fertilizantes potássicos.

O potássio (K) é o segundo elemento mais extraído pelas culturas, participando como ativador enzimático de diversas reações bioquímicas que ocorrem na planta, do metabolismo de carboidratos e dos mecanismos de abertura e fechamento dos estômatos (Malavolta, 2006). Estudos mais recentes, como o dCosta Júnior et al. (2024), destacaram que no Brasil a dependência externa por potássio alcançou cerca de 96% para as safras de 2021/2022, o que intensifica a busca por fontes nacionais alternativas. Nesse contexto, as rochas glauconíticas — como verdetes e siltitos glauconíticos — ocorrem em extensas áreas de Minas Gerais e apresentam teores de K_2O variando entre 5 e 12 %. Contudo, sua eficiência agronômica direta tem sido limitada pela baixa solubilidade (0,1-1,4 % em água; 0,7-2,3 % em ácido cítrico a 2 %) e pela necessidade de ativações físicas, térmicas, químicas ou biológicas para tornarem-se viáveis como fontes de K para curto/médio prazo (Costa Júnior et al., 2024).

A rochagem é uma técnica que consiste em realizar aplicação de rochas moídas e sua dissolução pela ação das raízes das plantas e comunidades microbianas, pode ser uma alternativa a adubação química e auxilia na melhoria da qualidade do solo, pois essa técnica pode ser utilizada como fonte de nutrientes para as plantas, além de poderem elevar o pH do solo e também alterar a mineralogia do solo, resultando em rejuvenescimento geológico e na melhoria da fertilidade do solo, devido ao aumento da capacidade de troca catiônica. Além disso, os efeitos benéficos do pó de rocha não se restringem apenas à esfera local, pois podem afetar o balanço de carbono (Granada et al., 2021).

Dentre as diversas rochas portadoras de K disponíveis no território brasileiro, os fonolitos provenientes do planalto de Poços de Caldas-MG têm se mostrado ótima opção para a agricultura mais sustentável e regenerativa, por serem oriundas de rochas ígneas e apresentarem em sua composição feldspatos e feldspatoides, ricos em potássio e baixa quantidade de sódio comparado aos fertilizantes químicos. Em condições de campo, o fonolito já foi testado como fonte de potássio em outras culturas como as culturas da cana-de-açúcar (Luz et al., 2013; Duarte et al., 2013), da soja, do milho, do feijão e arroz (Soratto et al., 2021), do eucalipto (Moraes Neto; Martins, 2020; Toledo et al., 2017) e do cafeeiro (Gatto et al., 2014), verificando-se resultados equivalentes àqueles obtidos com o uso KCl.

O objetivo com este capítulo foi avaliar a eficiência da rocha fonolito e verificar se houve diferenças significativas em relação ao cloreto de potássio (KCl) nos atributos químicos do solo e a capacidade de dessorção de K do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizada no município de Dourados/MS, nas coordenadas geográficas 22°13'52,4495" S, 54°59'10,5372" W e altitude de 411,75 m. Os experimentos foram conduzidos em condições de campo, abrangendo as safras 2021/2022 e 2022/2023 para a cultura da soja e as safras 2022, 2023 e 2024 para a cultura do milho. A área experimental apresenta histórico consolidado de cultivo sob semeadura direta, mantida continuamente por vários anos, com cobertura de solo. O sistema de produção predominante é de sucessão soja–milho, prática amplamente adotada na região Centro-Oeste pela boa adaptação das culturas, eficiência no uso de recursos e manutenção da qualidade físico-química do solo.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2018) e a análise dos atributos químicos solo e granulometria foi determinada antes da instalação do experimento, segundo metodologia proposta por Silva et al. (2009), na camada de 0-20 cm: pH(CaCl₂)=5,1; P (Mehlich-1) e S (mg dm⁻³)=15,55 e 11,95; Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CTC (cmol_c dm⁻³)=4,54; 2,24; 0,37; 0,00; 3,63; 7,15 e 10,78; V%=66%, já para a camada de 20-40 cm: pH(CaCl₂)=5,0; P(Mehlich-1) e S (mg dm⁻³)=9,45 e 41,70; Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CTC (cmol_c dm⁻³)=3,45; 1,59; 0,19; 0,00; 4,24; 5,23 e 9,47; V%=55%, com granulometria de 58% de argila, 29% de areia e 13% de silte.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, disposto em esquema fatorial 5 × 3, totalizando 15 tratamentos e 4 repetições, perfazendo 60 unidades experimentais. Os fatores avaliados consistiram em cinco doses de K₂O (0, 25, 50, 75 e 100% da dose recomendada, equivalentes a 0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O) e três fontes de potássio: cloreto de potássio (KCl; 60% de K₂O), aplicado na forma granulada, e duas fontes alternativas, ambas na forma de pó: Fonolito (8% de K₂O; 25% de Si; 1% de Ca; 0,5% de Mg; 0,001% de Zn; 0,0004% de Co; 0,15% de Mn) e Fonolito H. (12% de K₂O; 25% de Si; 0,10% de Ca; 0,10% de Mg; 0,01% de Zn; 0,001% de Co; 0,15% de Mn). As parcelas experimentais apresentaram 12 m de comprimento, sendo a área útil composta por 4 linhas centrais, com espaçamento de 0,45 m entre linhas.

Com base nas análises dos atributos químicos do solo, na expectativa de produtividade e extração pelas culturas foi realizada a adubação mineral de semeadura na cultura da soja, aplicando-se 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de MAP (fosfato monoamônico; 11% de N e 52%

de P_2O_5), na cultura da soja nas safras 2021/22 e 2022/23. As fontes de K_2O (KCl, Fonolito e Fonolito H.) foram aplicadas a lanço, manualmente, em área total 10 dias antes da semeadura, sem incorporação. No dia 05/11/2021 (safra 2021/22) e no dia 26/10/2022 (safra 2022/23) realizou-se a semeadura da soja com sementes (HO Pirapó IPRO) inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense*. Para a cultura da soja foram realizados todos os tratos culturais com herbicida, inseticida e fungicida sempre que necessários.

No dia 22/03/2022 (safra 2022), no dia 31/03/2023 (2023) e no dia 30/04/2024 foram realizadas a semeadura do milho. Na safra 2022 foi utilizada sementes do híbrido B2612 PWU, na safra 2023 foi utilizada sementes do híbrido B2620PWU e na safra 2024 foi utilizada sementes do híbrido B2612 PWU. inoculadas com *Azospirillum brasilense*. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada com 100 kg ha⁻¹ de nitrogênio (ureia) entre os estádios vegetativos V4 e V6 nas três safras. Para a cultura do milho foram realizados todos os tratos culturais com herbicida, inseticida e fungicida sempre que necessários.

Após a colheita da soja da safra 2021/22 (início) e do milho da safra 2024 (após 3 anos de aplicação de remineralizadores) foi coletado solo na camada de 0-20 cm para determinação dos atributos químicos do solo e a capacidade de dessorção de potássio do solo.

Para a determinação dos atributos químicos do solo utilizou-se metodologia descrita em Silva et al. (2009). As amostras foram coletadas na camada de interesse experimental, devidamente secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm (TFSA).

A capacidade de dessorção de K do solo foi determinada utilizando o extrator Mehlich-1, conforme metodologia descrita em Embrapa (2011).

Os dados obtidos foram submetidos aos testes preliminares de normalidade e homoscedasticidade. Após isto, os resultados foram analisados pela análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação de médias das fontes de potássio, e ajustadas a equações de regressão para o efeito das doses de K_2O , utilizando-se o programa SISVAR (Ferreira, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atributos químicos do solo após soja 2021/22 (início)

A interação entre fontes e doses de K_2O foi significativa para os teores de Ca, Mg, SB, CTC e V% (Tabela 1). As fontes de K_2O influenciaram os teores de Al e H+Al, com maior valor de $0,03 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al para o fonolito e $3,57 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de H+Al para o fonolito H. Os valores de pH, os teores de P e de K não foram influenciados pelas doses e fontes de K_2O , sendo a média geral de 5,4; $11,96 \text{ mg dm}^{-3}$ e $0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para os teores de pH, P e K, respectivamente (Tabela 1). Segundo Sousa e Lobato (2004), os teores de P estão adequados, enquanto os teores de K apresentaram redução de alto ($0,37 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para médio ($0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Estudos indicam que o fonolito, uma rocha alcalina rica em potássio, pode liberar esse nutriente lentamente no solo, influenciando atributos como Ca, Mg, SB, CTC e V% (Cruz et al., 2021). Além disso, a interação entre o fonolito e a acidez do solo pode afetar os teores de Al e H+Al, conforme observado nos resultados.

Tabela 1. Atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm após a colheita da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K_2O)

Tratamentos	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC	V%
	CaCl ₂	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³				%
Fontes de K₂O										
KCl	5,5a	11,25a	3,37	1,11	0,09a	0,00b	2,69b	4,61	7,30	60,1
Fonolito	5,3a	11,62a	3,90	1,74	0,09a	0,03a	2,87b	5,72	8,60	66,0
Fonolito H.	5,4a	13,00a	4,43	2,20	0,12a	0,00b	3,57a	6,71	10,28	65,0
DMS	0,2	5,54	0,62	0,34	0,04	0,03	0,48	0,05	0,93	5,2
Doses de K₂O										
kg ha ⁻¹										
0	5,3 ^{ns}	12,85 ^{ns}	3,99	1,51	0,12 ^{ns}	0,01 ^{ns}	2,89 ^{ns}	5,59	8,48	65,4
25	5,4	12,40	3,66	1,56	0,09	0,00	2,89	5,44	8,33	64,1
50	5,4	11,96	3,61	1,49	0,10	0,00	3,02	5,04	8,06	59,7
75	5,5	11,51	3,85	1,76	0,09	0,03	3,38	5,78	9,15	62,4
100	5,5	11,10	4,38	2,10	0,09	0,01	3,05	6,56	9,61	68,1
CV (%)	4,34	15,00	20,65	26,27	25,25	30,00	20,73	20,73	13,89	10,6
Média	5,4	11,96	3,90	1,68	0,10	0,01	3,04	5,68	8,72	64,0

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esses resultados estão dentro do esperado, pois os remineralizadores apresentam baixo tempo de reação no solo (Swoboda et al., 2022; Nogueira et al., 2021).

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para o teor de Ca no solo, observou-se que somente para o KCl houve efeito significativo das doses de K_2O , com ponto de mínimo aos 38,6 kg ha⁻¹ de K_2O . Já para as fontes de K_2O , na dose 0, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O , as fontes não diferiram entre si, enquanto nas doses de 25 e 50 kg ha⁻¹, os maiores teores de Ca foram obtidos com a utilização de Fonolito e Fonolito H. Uma possível explicação para a redução dos teores de Ca no solo com a aplicação de KCl seria a competição entre Ca e K na CTC, embora não tenha ocorrido de forma linear, visto que nas doses de 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O o teor de Ca aumentou.

Tabela 2. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para o teor de cálcio (Ca) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	Ca no solo (cmolc dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	3,56 ¹ a	4,22 ^{ns} a	4,15 ^{ns} a
25	2,68 b	4,01 a	4,63 a
50	1,82 b	3,85 a	4,54 a
75	4,13 a	3,74 a	4,19 a
100	4,67 a	3,68 a	4,63 a
DMS		1,39	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{ Ca no solo KCl} = 3,4965 - 0,0541x + 0,0007x^2 \quad R^2=0,76$$

Ao comparar o KCl com os remineralizadores, é esperado que os teores de Ca sejam maiores ou iguais com a utilização dos fonolitos, pois além de fornecerem Ca, os remineralizadores liberam K de forma gradual, reduzindo a competição na adsorção de Ca na CTC (Cruz et al., 2021; Da Rocha Neto et al., 2024).

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para o teor de Mg no solo, observou-se que somente para o KCl houve efeito significativo das doses de K_2O , com ponto de mínimo aos 32,5 kg ha⁻¹ de K_2O . Já para as fontes de K_2O , nas doses de 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O , as fontes não diferiram entre si, enquanto nas doses de 0, 25 e 50 kg ha⁻¹, os maiores teores de Mg foram obtidos com a utilização de Fonolito e Fonolito H.

Tabela 3. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para o teor de magnésio (Mg) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Mg no solo (cmolc dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	0,86 ¹ b	1,84 ^{ns} a	1,83 ^{ns} a
25	0,53 b	1,88 a	2,28 a
50	0,33 b	1,72 a	2,43 a
75	1,74 a	1,52 a	2,01 a
100	2,10 a	1,73 a	2,47 a
DMS		0,76	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{Mg no solo KCl} = 0,8027 - 0,0195x + 0,0003x^2 \quad R^2=0,84$$

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o valor de SB no solo, observou-se que somente para o KCl houve efeito significativo das doses de K₂O, com ponto de mínimo aos 37,5 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 4). Já para as fontes de K₂O, nas doses de 0, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O, as fontes não diferiram entre si, enquanto nas doses de 25 e 50 kg ha⁻¹, os maiores teores de SB foram obtidos com a utilização de Fonolito e Fonolito H.

Tabela 4. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a soma de bases (SB) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	SB no solo (cmolc dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	4,58 ¹ a	6,12 ^{ns} a	6,06 ^{ns} a
25	3,30 b	6,04 a	6,98 a
50	2,26 b	5,82 a	7,05 a
75	6,00 a	5,05 a	6,28 a
100	6,90 a	5,60 a	7,19 a
DMS		2,02	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{SB no solo KCl} = 4,4476 - 0,0750x + 0,0010x^2 \quad R^2=0,79$$

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o valor de CTC no solo, observou-se que tanto para o KCl quanto para o Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O: para o KCl, o ponto de mínimo ocorreu aos 37,2 kg ha⁻¹ de K₂O, enquanto para o

Fonolito H., os valores de CTC aumentaram progressivamente com o aumento das doses de K₂O. Já para as fontes de K₂O, nas doses de 0, 75 e 100 kg ha⁻¹, as fontes não diferiram entre si, enquanto nas doses de 25 e 50 kg ha⁻¹, os maiores valores de CTC foram obtidos com a utilização de Fonolito e Fonolito H.

Tabela 5. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	CTC (cmol _c dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	7,37 ¹ a	8,96 ^{ns} a	9,10 ² a
25	6,24 b	8,79 a	9,95 a
50	4,86 b	8,70 a	10,63 a
75	8,71 b	7,89 b	10,86 a
100	9,33 ab	8,62 b	10,88 a
DMS		2,08	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ CTC no solo KCl = 7,2681 - 0,0743x + 0,0010x² R²=0,72

² CTC no solo Fonolito H. = 9,3910 + 0,0178x R²=0,86

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o valor de V% no solo, observou-se que para o KCl houve efeito significativo das doses de K₂O, com ponto de mínimo aos 38,7 kg ha⁻¹ de K₂O. Já para as fontes de K₂O, nas doses de 0, 75 e 100 kg ha⁻¹, as fontes não diferiram entre si, enquanto nas doses de 25 e 50 kg ha⁻¹, os maiores valores de V% foram obtidos com a utilização de Fonolito e Fonolito H.

Os resultados dos teores de Ca, Mg, SB, CTC e V% corroboram com estudos que indicam que remineralizadores como o fonolito liberam cátions de forma gradual, aumentando a SB, CTC e V%, contribuindo para a manutenção da fertilidade química do solo (Cruz et al., 2021; Da Rocha Neto et al., 2024; Santana et al., 2025; Soratto et al., 2021a; Souza et al., 2023).

Tabela 6. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para Saturação por Bases (V%) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	V%		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	61,6 ¹ a	67,9 ^{ns} a	66,7 ^{ns} a
25	53,6 b	69,0 a	69,8 a
50	46,7 b	66,7 a	65,8 a
75	66,0 a	63,0 a	57,9 a
100	73,9 a	64,5 a	66,0 a
DMS	11,65		

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ V% no solo KCl = 61,2171 - 0,5111x + 0,0066x² R²=0,83

A interação fontes × doses de K₂O foi significativa para os teores de Cu e Fe (Tabela 7). As fontes de K₂O influenciaram os teores de Mn e Zn, com maiores valores de Mn quando se utilizou o KCl e o Fonolito, já para o Zn, o maior valor foi encontrado com a utilização de KCl quando comparado ao Fonolito e semelhante ao Fonolito H. As doses de K₂O influenciaram os teores de Zn, sendo que à medida que aumentaram as doses de K₂O, diminuíram os teores de Zn (Tabela 7).

Esses resultados corroboram estudos que indicam que a aplicação de fontes potássicas pode afetar a disponibilidade de micronutrientes devido à competição iônica na CTC e alterações no equilíbrio de cátions e ânions no solo (Da Rocha Neto et al., 2024; Silveira et al., 2025). Por outro lado, fontes alternativas de K, como remineralizadores silicatados (fonolito e fonolito hidrotermalizado), tendem a liberar K de maneira gradual, minimizando os efeitos competitivos sobre os micronutrientes. Soratto et al. (2021a, 2021b) relataram que o uso de rochas potássicas manteve maiores teores de Fe e Mn disponíveis no solo, possivelmente devido à liberação concomitante de Si, que pode reduzir a adsorção específica desses elementos em óxidos de Fe e Al.

Tabela 7. Teores de cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) do solo na camada de 0-20 cm após a colheita da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K₂O)

Tratamentos	Cu	Mn	Fe	Zn
Fontes de K₂O			mg dm ⁻³	
KCl	10,70	67,38 a	43,42	1,00 a
Fonolito	9,59	59,78 a	32,80	0,62 b
Fonolito H.	10,46	49,01 b	42,43	0,76 ab
DMS	0,50	10,16	5,63	0,23
Doses de K₂O				
kg ha⁻¹				
0	10,38	62,76 ^{ns}	36,37	0,98 ¹
25	10,25	61,18	36,21	0,87
50	9,95	57,24	38,09	0,80
75	10,10	58,04	38,79	0,74
100	10,55	54,40	48,30	0,57
CV (%)	6,38	22,51	18,54	30
Média	10,25	58,72	39,55	0,79

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{Zn no solo} = 0,9817 - 0,0034x \quad R^2=0,97$$

Esse comportamento indica que a aplicação de K, especialmente na forma de KCl, pode interferir na disponibilidade de micronutrientes metálicos, promovendo desequilíbrios no complexo coloidal e na solução do solo. Em solos tropicais altamente intemperizados, a elevação do teor de K trocável tende a reduzir a adsorção de cátions bivalentes, como Zn²⁺, Cu²⁺, Fe²⁺ e Mn²⁺, pela competição direta por cargas negativas dos coloides e pela modificação da carga superficial de óxidos e argilas (Nascimento et al., 2022; Santos et al., 2020). Além disso, os remineralizadores apresentam em sua composição pequenas quantidades de micronutrientes como Fe, Mn e Zn, que podem contribuir para o aumento de sua disponibilidade no solo ao longo do tempo (Gatto et al., 2014; Cruz et al., 2021).

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o teor de Cu no solo, observou-se que para o Fonolito e Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O, com ponto de mínimo aos 66,9 kg ha⁻¹ de K₂O para o Fonolito, enquanto para o Fonolito H., os teores de Cu diminuíram linearmente à medida que aumentaram as doses. Para as fontes de K₂O, verificou-se que na dose 0 kg ha⁻¹ de K₂O, o Fonolito apresentou maiores teores de Cu no solo, não diferindo do KCl; na dose 25 kg ha⁻¹, o KCl apresentou o maior valor, não diferindo do Fonolito H.; na dose 50 kg ha⁻¹, KCl e Fonolito H. apresentaram os maiores teores de Cu; na dose 75 kg ha⁻¹, o Fonolito H. apresentou o maior teor; e na dose 100 kg ha⁻¹, KCl e Fonolito H. apresentaram os maiores teores de Cu (Tabela 8).

Tabela 8. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para o teor de cobre (Cu) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Cu (mg dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	10,56 ^{ns} ab	11,07 ¹ a	9,51 ² b
25	11,24 a	9,21 b	10,31 ab
50	10,84 a	8,86 b	10,15 a
75	9,84 b	9,36 b	11,11 a
100	10,98 a	9,47 b	11,21 a
DMS		1,12	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Cobre no solo Fonolito = 10,8874 - 0,0669x + 0,0005x² R²=0,88

² Cobre no solo Fonolito H. = 9,6135 + 0,0169x R²=0,88

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o teor de Fe no solo, observou-se que para o Fonolito e Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O, com ponto de mínimo aos 59,3 kg ha⁻¹ de K₂O para o Fonolito, enquanto para o Fonolito H., os teores de Fe aumentaram linearmente à medida que as doses foram incrementadas. Para as fontes de K₂O, verificou-se que na dose 0 kg ha⁻¹ de K₂O, o Fonolito apresentou maiores teores de Fe, não diferindo do KCl; na dose 25 kg ha⁻¹, o KCl apresentou o maior teor; na dose 50 kg ha⁻¹, KCl e Fonolito H. apresentaram os maiores teores de Fe; na dose 75 kg ha⁻¹, o Fonolito H. apresentou o maior teor; e na dose 100 kg ha⁻¹, KCl e Fonolito H. apresentaram os maiores teores de Fe no solo (Tabela 9).

Tabela 9. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para o teor de ferro (Fe) no solo na camada de 0-20 cm após a colheita da cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Fe no solo (mg dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	35,27 ^{ns} ab	45,03 ¹ a	28,81 ² b
25	46,94 a	30,50 b	31,20 b
50	45,98 a	25,60 b	42,68 a
75	34,77 b	29,59 b	52,02 a
100	54,16 a	33,31 b	58,03 a
DMS			

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Ferro no solo Fonolito = 44,1640 - 0,6163x + 0,0052x² R²=0,95

² Ferro no solo Fonolito H. = 26,8165 + 0,3122x R²=0,97

De acordo com Sousa e Lobato (2004), os teores de Cu e Zn no solo são considerados altos.

Os resultados das interações estão de acordo com estudos que indicam que a aplicação de remineralizadores como o fonolito pode afetar a disponibilidade de micronutrientes no solo, incluindo Cu e Fe, devido à liberação gradual de cátions e à interação com a CTC, o que contribui para a manutenção da fertilidade e a redução da competição entre nutrientes (Taques, 2024; Santana et al., 2025).

Atributos químicos do solo após milho 2024 (3 anos utilizando remineralizadores)

A interação fontes × doses de K₂O foi significativa apenas para o valor de pH, já para os demais atributos não houve interação, havendo efeito isolado das doses e fontes de K₂O (Tabela 10).

Tabela 10. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K₂O) para os atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm após a colheita do milho safra 2024

Tratamentos	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC	V%
	CaCl ₂	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³					%		
Fontes de K ₂ O										
KCl	5,0	9,80a	6,81a	3,28b	0,24a	0,07 a	2,52b	10,33ab	12,85a	80,3a
Fonolito	5,0	11,65a	6,37a	3,31b	0,13c	0,14 a	2,75a	9,81b	12,58a	77,9b
Fonolito H.	5,0	10,17a	6,81a	3,79a	0,18b	0,07 a	2,49b	10,77a	13,27a	81,0a
DMS	0,03	3,69	0,56	0,32	0,04	0,07	0,19	0,78	0,73	2,1
Doses de K ₂ O										
kg ha ⁻¹										
0	5,0	11,06 ^{ns}	6,59 ¹	3,61 ²	0,15 ³	0,09 ^{ns}	2,91 ⁴	10,35 ⁵	13,26 ⁶	78,0 ⁷
25	4,9	8,72	6,37	2,98	0,15	0,14	2,51	9,49	12,00	79,0
50	5,0	10,64	6,80	3,38	0,17	0,08	2,60	10,31	12,92	79,4
75	5,0	12,19	6,60	3,58	0,19	0,10	2,51	10,36	12,88	80,3
100	5,0	10,10	6,98	3,78	0,25	0,06	2,40	11,00	13,40	81,8
CV (%)	0,85	45,45	10,95	12,17	28,91	40,00	9,39	9,84	7,42	3,35
Média	5,0	10,54	6,67	3,46	0,18	0,09	2,59	10,30	12,89	79,7

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$\begin{aligned}
 {}^1 \text{Ca} &= 6,5512 - 0,0026x + 0,00007x^2 & R^2 &= 0,56 \\
 {}^2 \text{Mg} &= 3,4877 - 0,0138x + 0,0002x^2 & R^2 &= 0,67 \\
 {}^3 \text{K} &= 0,1520 - 0,0005x + 0,00001x^2 & R^2 &= 0,99 \\
 {}^4 \text{H+Al} &= 2,8442 - 0,0085x + 0,00004x^2 & R^2 &= 0,75 \\
 {}^5 \text{SB} &= 10,1878 - 0,0168x + 0,0003x^2 & R^2 &= 0,72 \\
 {}^6 \text{CTC} &= 13,0344 - 0,0253x + 0,0003x^2 & R^2 &= 0,53 \\
 {}^7 \%V &= 77,9067 + 0,0365 x & R^2 &= 0,96
 \end{aligned}$$

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para o valor de pH no solo, observou-se que tanto para o KCl quanto para o Fonolito H., à medida que aumentaram as doses, o valor de pH do solo também aumentou. Para as fontes de K_2O , verificou-se que nas doses de 0 e 25 kg ha⁻¹, as fontes não diferiram entre si; nas doses de 50 e 100 kg ha⁻¹, o maior valor de pH foi obtido com o uso do Fonolito H., seguido de KCl e Fonolito; e para a dose de 75 kg ha⁻¹, o maior valor de pH foi observado com a utilização do Fonolito H. (Tabela 11).

Esses resultados corroboram estudos que indicam que remineralizadores como o fonolito podem aumentar o pH do solo devido, promovendo a neutralização da acidez do solo e contribuindo para a melhoria da fertilidade química (Da Rocha Neto et al., 2020; Souza et al., 2023; Santana et al., 2025; Taques, 2024).

Tabela 11. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para o valor de pH no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	pH do solo		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	5,02 ¹ a	5,02 ² a	5,02 ² a
25	4,94 a	4,90 a	4,90 a
50	4,98 b	4,84 c	5,09 a
75	4,98 b	4,92 b	5,18 a
100	5,01 b	4,90 c	5,25 a
DMS	0,09		

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ pH do solo KCl = $5,0106 - 0,0021x + 0,00002x^2$ $R^2=0,66$

² pH do solo Fonolito = $5,0103 - 0,0050x + 0,00004x^2$ $R^2=0,77$

³ pH do solo Fonolito H. = $4,9480 + 0,0027x$ $R^2=0,70$

Para os teores de P foi encontrada a média de 10,54 mg dm⁻³ de P (Tabela 10). De acordo com Sousa e Lobato (2004), os teores de P estão adequados, variando de 8,1 a 12,0 mg dm⁻³.

Esses resultados corroboram estudos que indicam que a aplicação de remineralizadores como o fonolito e outros pós de rochas alcalinas não alteram significativamente os teores de fósforo disponível no solo, uma vez que a liberação gradual de cátions não interfere diretamente na disponibilidade de P, mantendo os níveis adequados para o desenvolvimento das culturas (Da Rocha Neto et al., 2020; Souza et al., 2023; Santana et al., 2025). Ferreira et al. (2021) destacaram ainda que a presença de silício liberado pelo fonolito pode reduzir a fixação de P,

devido à competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção em óxidos de ferro e alumínio, o que pode contribuir para manter o P em formas mais disponíveis.

Por outro lado, alguns estudos apontam efeitos diferenciados dependendo das características do solo e da composição mineral das fontes aplicadas. Nascimento et al. (2022) verificaram que o uso de KCl em doses elevadas promoveu ligeira redução nos teores de P disponível, possivelmente pela formação de pares iônicos com Ca^{2+} e Mg^{2+} ou pela influência do Cl^- sobre o equilíbrio iônico na solução do solo. Já Cruz et al. (2021) relataram que, em solos de textura média, o uso de fonolito proporcionou aumento discreto na disponibilidade de P após dois ciclos de cultivo, sugerindo que, a longo prazo, a mineralização e o intemperismo dos minerais primários podem liberar quantidades adicionais de fósforo.

Para os teores de Ca no solo, não foi observada diferença entre as fontes de K_2O , já para as doses de K_2O , observou ponto de mínimo com a dose de $18,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O . Para os teores de Mg, observou-se que o Fonolito H. apresentou os maiores teores de Mg, para as doses de K_2O , observou ponto de mínimo com a dose de $3,45 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O . Esses resultados podem ser justificados por diversos fatores: (i) a liberação gradual de cátions pelos remineralizadores, em especial Mg^{2+} , que ocorre de forma contínua ao longo do tempo, contribuindo para níveis mais estáveis no solo (Da Rocha Neto et al., 2020); (ii) a competição iônica na CTC, em que a presença de K^+ e Ca^{2+} pode reduzir temporariamente a disponibilidade de Mg, explicando os pontos de mínimo observados em doses intermediárias (Taques, 2024); (iii) a influência do pH do solo, uma vez que o aumento do pH promovido pelo Fonolito H. favorece a retenção de Mg, reduzindo perdas por lixiviação; e (iv) o tempo de reação desses remineralizadores no solo, que depende de processos de intemperismo físico-químico e microbiológico, permitindo a liberação gradual do Mg e mantendo sua disponibilidade ao longo do ciclo das culturas (Souza et al., 2023; Santana et al., 2025).

Para os teores de K, observou-se que o KCl seguido do Fonolito H. apresentaram os maiores teores de K, para as doses de K_2O , observou ponto de mínimo com a dose de $25,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O . De acordo com Sousa e Lobato (2004), os teores de K são considerados adequados ($0,14\text{-}0,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Esses resultados corroboram estudos que indicam que fontes minerais como o KCl aumentam rapidamente a disponibilidade de K no solo, enquanto remineralizadores como o fonolito liberam K de forma gradual, mantendo níveis médios adequados e minimizando perdas por lixiviação (Da Rocha Neto et al., 2020; Cruz et al., 2021; Souza et al., 2023; Santana et al., 2025).

Para os teores de $H+Al$, o Fonolito apresentou a maior acidez potencial, para as doses de K_2O , observou ponto de mínimo com a dose de $106,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O . Para os valores de SB, o Fonolito H apresentou os maiores valores quando comparado ao Fonolito, não diferindo do KCl, para as doses de K_2O , observou ponto de mínimo com a dose de 28 kg ha^{-1} de K_2O . Para os valores de CTC, as fontes não diferiram entre si, já para as doses de K_2O , observou ponto de mínimo com a dose de $42,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O .

Para o V%, os maiores valores foram encontrados com o KCl e Fonolito H, sendo que para as doses de K_2O , à medida que aumentaram as doses, aumentou o V%. De modo análogo, Gatto et al. (2014) e Dias (2025) relataram que o uso de pós de rocha potássica contribuiu para o aumento do pH e da saturação por bases, além de elevar os teores de Ca e Mg disponíveis no solo ao longo do tempo.

A interação fontes $\times$ doses de K_2O não foi significativa apenas para os teores de Zn no solo (Tabela 12), sendo que o maior teor de Zn foi observado quando se utilizou o KCl, enquanto as doses de K_2O não exerceram efeito significativo. Esses resultados estão de acordo com estudos que indicam que a disponibilidade de Zn no solo é pouco afetada pela aplicação de remineralizadores ou fertilizantes potássicos, devido à sua baixa mobilidade e à forte adsorção em solos com alta saturação por bases, sendo mais influenciada por fatores como pH e conteúdo de matéria orgânica (Santana et al., 2025).

De acordo com Santana et al. (2025), a dinâmica do Zn é fortemente controlada por fatores edáficos, como pH, textura e teor de matéria orgânica, sendo apenas marginalmente influenciada pela adubação potássica. Resultados semelhantes foram relatados por Souza et al. (2023), que observaram ausência de efeito significativo da aplicação de remineralizadores e de fontes solúveis de K sobre os teores disponíveis de Zn em solos tropicais. Esses autores destacam que, em ambientes com alta saturação por bases, o aumento do pH favorece a precipitação ou a adsorção específica do Zn em óxidos de Fe e Al, reduzindo sua disponibilidade para as plantas.

Por outro lado, Cruz et al. (2021) observaram que, em solos de textura média e pH mais baixo, a aplicação de KCl pode aumentar ligeiramente a disponibilidade de Zn devido à substituição competitiva de cátions na CTC e à maior solubilização de micronutrientes em ambientes mais ácidos.

Tabela 12. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K₂O) para os teores de cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) do solo na camada de 0-20 cm após a colheita do milho safra 2024

Tratamentos	Cu	Mn	Fe	Zn
Fontes de K₂O	mg dm⁻³			
KCl	8,64	53,71	33,29	0,81a
Fonolito	8,50	46,48	34,18	0,63b
Fonolito H.	7,72	48,14	28,18	0,64b
DMS	0,43	4,62	3,37	0,16
Doses de K₂O kg ha⁻¹				
0	8,20	55,23	26,84	0,79 ^{ns}
25	8,39	46,67	31,71	0,71
50	8,46	47,37	34,09	0,58
75	8,18	46,29	32,64	0,74
100	8,21	51,67	34,15	0,68
CV (%)	6,80	12,15	13,75	29,37
Média	8,28	49,44	31,88	0,69

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o teor de Cu no solo, observou-se que tanto para o KCl quanto para o Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O. Para o KCl, à medida que as doses aumentaram, os teores de Cu também aumentaram, enquanto para o Fonolito H., os teores de Cu diminuíram linearmente com o aumento das doses de K₂O. Em relação às fontes, na testemunha e na dose de 25 kg ha⁻¹ de K₂O, não houve diferença significativa entre elas; na dose de 50 kg ha⁻¹, o maior teor de Cu foi obtido com o Fonolito H.; e nas doses de 75 e 100 kg ha⁻¹, os maiores teores de Cu foram observados com o KCl e o Fonolito (Tabela 13).

Esses resultados podem ser explicados pelo fato de que fontes solúveis como o KCl liberam rapidamente cátions, incluindo Cu, aumentando sua disponibilidade imediata, enquanto remineralizadores como o Fonolito H. promovem liberação gradual e podem ocorrer interações competitivas na CTC, reduzindo a disponibilidade de Cu em doses mais altas. Além disso, o pH do solo e a saturação por bases influenciam a mobilidade do Cu, podendo explicar a diminuição observada em doses elevadas de Fonolito H. (Souza et al., 2023; Santana et al., 2025).

Segundo Souza et al. (2023) e Santana et al. (2025), o comportamento do Cu no solo está fortemente relacionado ao pH, teor de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica,

sendo que o aumento do pH e da saturação por bases, comum após aplicações de fontes minerais alcalinas, tende a reduzir a solubilidade do Cu. Resultados semelhantes foram observados por Cruz et al. (2021), que verificaram redução dos teores disponíveis de Cu em solos tratados com remineralizadores, principalmente em doses elevadas, devido à formação de complexos insolúveis e ao aumento do pH. Já da Rocha Neto et al. (2020) destacam que, embora os remineralizadores liberem nutrientes de forma gradual, a interação com a química do solo pode afetar de forma distinta cada micronutriente, sendo o Cu um dos mais sensíveis a variações de pH e equilíbrio catiônico.

Tabela 13. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para os teores de cobre (Cu) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Cu no solo (mg dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	8,20 ¹ a	8,20 ^{ns} a	8,20 ² a
25	8,09 a	8,57 a	8,50 a
50	8,66 c	8,64 b	8,08 a
75	9,11 a	8,66 a	6,74 b
100	9,13 a	8,45 a	7,06 b
DMS		2,23	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Cu no solo KCl = 8,0610 + 0,0115x R²=0,86

² Cu no solo Fonolito H. = 8,5230 - 0,0161x R²=0,70

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o teor de Mn no solo, observou-se que tanto para o KCl quanto para o Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O. Para o KCl, o ponto de mínimo teor de Mn ocorreu com as doses de 40,8 kg ha⁻¹, enquanto para o Fonolito, o ponto de mínimo foi observado aos 59,8 kg ha⁻¹ de K₂O. Em relação às fontes, no controle e na dose de 25 kg ha⁻¹ de K₂O não houve diferença significativa; na dose de 50 kg ha⁻¹, o maior teor de Mn foi obtido com o Fonolito H., não diferindo do KCl; na dose de 75 kg ha⁻¹, o maior teor foi com o KCl; e na dose de 100 kg ha⁻¹, os maiores teores de Mn foram obtidos com o KCl e o Fonolito (Tabela 14).

Esses resultados podem ser explicados pela interação entre a liberação de cátions dos fertilizantes e a CTC do solo, em que fontes solúveis como o KCl liberam rapidamente Mn disponível, enquanto remineralizadores como o Fonolito H. promovem liberação gradual,

permitindo manutenção da disponibilidade de Mn em doses intermediárias. Além disso, o pH do solo e a saturação por bases influenciam a mobilidade do Mn, contribuindo para as variações observadas nos teores (Santana et al., 2025).

Tabela 14. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para os teores de manganês (Mn) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Mn no solo (mg dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	55,23 ¹ a	55,23 ² a	55,23 ^{ns} a
25	49,60 a	45,71 a	44,72 a
50	50,00 ab	40,46 b	51,59 a
75	56,24 a	43,77 b	38,85 b
100	57,50 a	47,22 a	50,31 b
DMS		10,32	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Mn no solo KCl = $54,2784 - 0,1794x + 0,0022x^2$ $R^2=0,74$

² Mn no solo Fonolito = $54,9964 - 0,4661x + 0,0039x^2$ $R^2=0,97$

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para o teor de Fe no solo, observou-se que todos os fertilizantes apresentaram efeito significativo das doses de K₂O. Para o KCl, o ponto de mínimo teor de Fe ocorreu com a dose de 25 kg ha⁻¹, enquanto para o Fonolito o ponto de mínimo foi observado aos 0 kg ha⁻¹ de K₂O. Em relação às fontes, na testemunha e na dose de 50 kg ha⁻¹ de K₂O não houve diferença significativa; na dose de 25 kg ha⁻¹, os maiores teores de Fe foram obtidos com o Fonolito e o Fonolito H.; na dose de 75 kg ha⁻¹, o maior teor foi com o KCl; e na dose de 100 kg ha⁻¹, os maiores teores de Fe foram observados com o KCl e o Fonolito (Tabela 15).

Esses resultados podem ser atribuídos à interação entre a liberação de cátions pelos fertilizantes e a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, que influencia diretamente a disponibilidade de micronutrientes. O KCl, por ser uma fonte altamente solúvel, promove rápida liberação de K⁺, o que pode intensificar a competição iônica com o Fe²⁺ e Fe³⁺ nos sítios de adsorção, reduzindo temporariamente sua disponibilidade nas menores doses. No entanto, em doses mais elevadas, a maior concentração de sais pode favorecer a dessorção de Fe dos coloides, elevando seus teores disponíveis. Já os remineralizadores, como o Fonolito e o Fonolito H., apresentam liberação lenta e contínua de nutrientes, incluindo o Fe, o que resulta

em uma disponibilidade mais estável ao longo do tempo, sem causar desequilíbrios bruscos na dinâmica iônica do solo (Cruz et al., 2021; Souza et al., 2023).

Além disso, o comportamento do Fe é fortemente influenciado pelo pH e pela saturação por bases, fatores que modulam sua solubilidade e mobilidade. Solos com pH mais elevado, frequentemente observados após o uso de remineralizadores, tendem a apresentar maior precipitação de Fe na forma de óxidos e hidróxidos, diminuindo sua fração disponível. Em contrapartida, a presença de silício e alumínio liberados pelas rochas alcalinas pode contribuir para a complexação de Fe, reduzindo perdas por precipitação e mantendo níveis adequados na solução do solo.

Resultados semelhantes foram reportados por Souza et al. (2023) e Cruz et al. (2021), que observaram comportamento variável do Fe em solos tratados com diferentes fontes de K, associado à interação entre o tipo de fertilizante e a química do solo. da Rocha Neto et al. (2020) também verificaram que remineralizadores como o fonolito promovem uma liberação gradual de Fe e outros micronutrientes, garantindo maior estabilidade na disponibilidade ao longo do ciclo das culturas. Santana et al. (2025) complementam que a dinâmica do Fe no solo está intimamente ligada ao equilíbrio entre as formas solúveis e adsorvidas, o que explica as variações encontradas entre fontes e doses de K₂O.

Tabela 15. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para os teores de ferro (Fe) no solo na cama de 0-20 cm após a colheita da cultura do milho safra 2024

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Fe no solo (mg dm ⁻³)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	26,84 ¹ a	26,84 ² a	26,84 ³ a
25	24,90 b	35,70 a	34,52 a
50	34,81 a	34,97 a	32,50 a
75	41,91 a	33,08 b	22,93 c
100	38,01 a	40,33 a	24,12 b
DMS		10,32	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

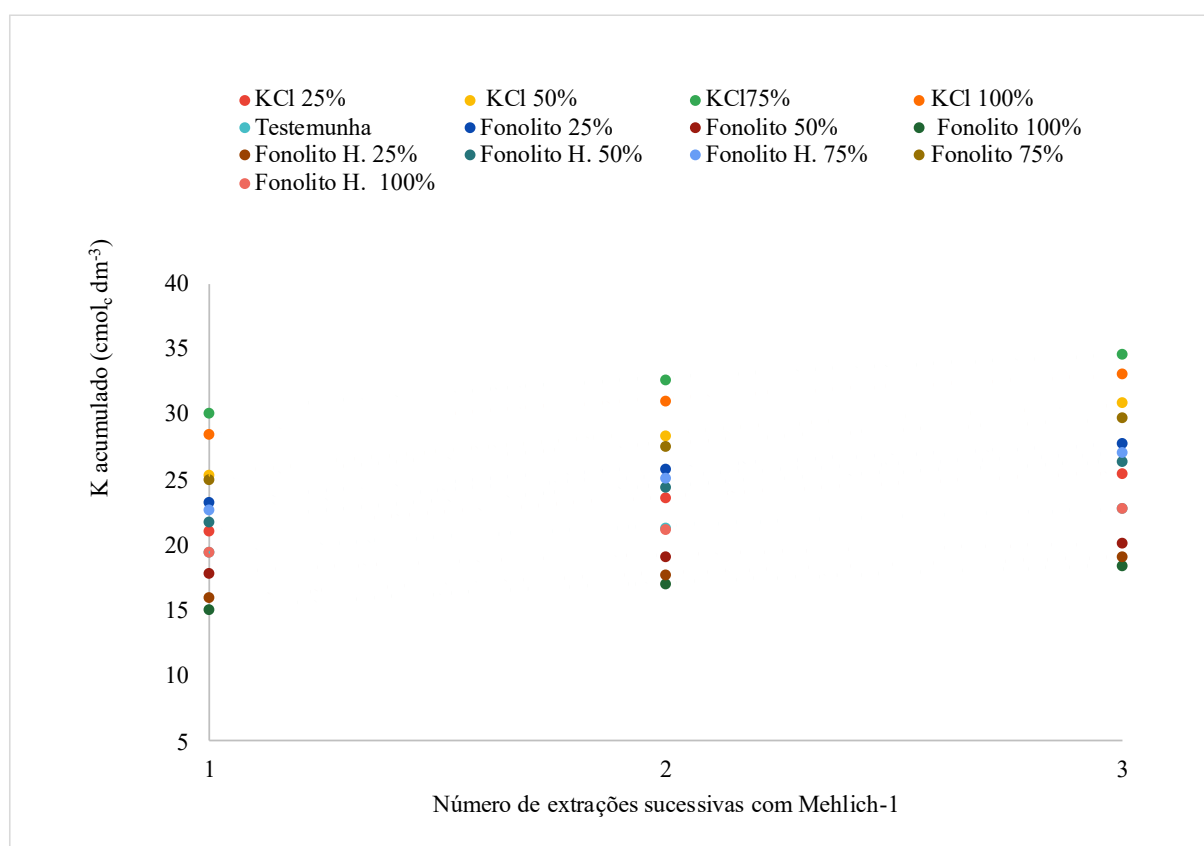
$$^1 \text{ Fe no solo KCl} = 24,4586 + 0,2343x - 0,0008x^2 \quad R^2=0,74$$

$$^2 \text{ Fe no solo Fonolito} = 28,6794 + 0,1478x - 0,0005x^2 \quad R^2=0,63$$

$$^2 \text{ Fe no solo Fonolito H.} = 28,6519 + 0,1666x + 0,0023x^2 \quad R^2=0,56$$

Capacidade de dessorção de potássio do solo

O potássio acumulado no solo na camada de 0-20 cm após 3 extrações sucessivas após a safra de soja 2021/22 e safra de milho 2024 encontram-se nas Figuras 2A e 2B. Observou-se que tanto no início do experimento (Figura 2A) como após 3 anos de experimentos safra de milho 2024 (Figura 2B), os maiores valores de K acumulado foi encontrado com a utilização de KCl ($75 > 100 > 50 > 25 > 0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O), depois com a utilização de Fonolito ($100 > 75 > 50 > 25 > 0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O) e por fim com o uso de Fonolito H. ($100 > 75 > 50 > 25 > 0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O).



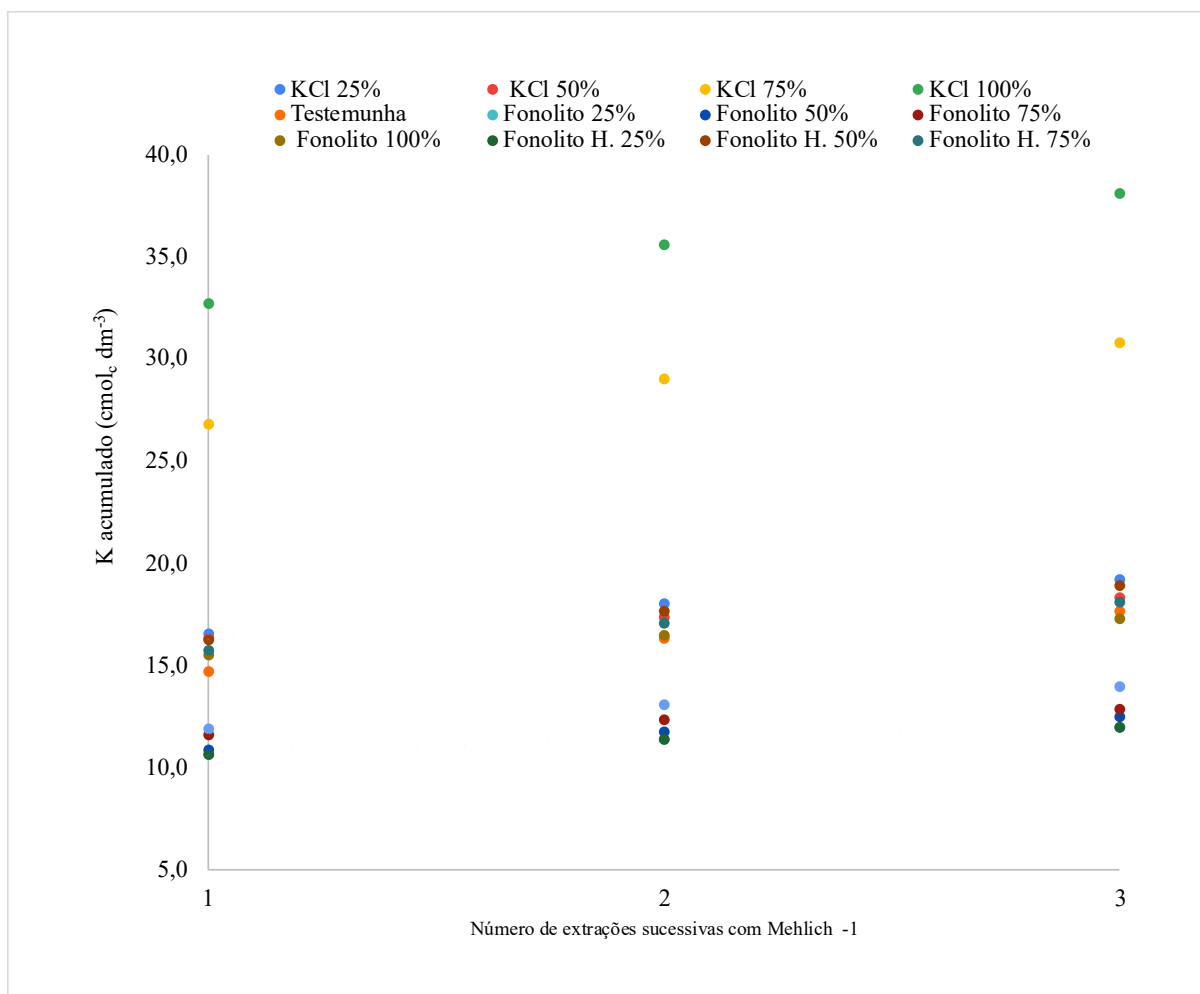


Figura 2. Extrações sequenciais de potássio (K) na camada de 0,0–0,20 m de um Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com fontes e doses de K_2O , após a safra da safra 2021/22 – início (A) e após a safra de milho 2024 (três anos de experimento) término (B).

Com relação ao maior acúmulo de K no solo com a utilização de maiores doses, essa relação é esperada e confirma que a quantidade de K aplicado reflete diretamente na disponibilidade final do nutriente.

Após a safra de soja 2021/22, com relação às fontes de K_2O , o KCl na maior dose foi o tratamento com maior acúmulo de K, atingindo cerca de 35–36 $cmol_c\ dm^{-3}$ após três extrações. O Fonolito e Fonolito H. na maior dose apresentaram valores menores (aproximadamente 26 e 22 $cmol_c\ dm^{-3}$, respectivamente), o que sugere menor liberação ou disponibilidade imediata de K.

Após a safra do milho 2024, com relação às fontes de K_2O , o KCl apresentou os maiores valores absolutos de K acumulado em todas as doses e extrações. Na extração 3, o KCl com a maior dose, atingiu cerca de 37–38 $cmol_c\ dm^{-3}$, superando todas as outras fontes.

O Fonolito apresentou valores intermediários, com boa liberação, mas menor acúmulo que o KCl nas mesmas doses. O Fonolito H. apresentou os menores valores de K acumulado, mesmo em doses altas, indicando liberação mais lenta ou menor solubilidade do K_2O aplicado.

O KCl, por ser altamente solúvel, libera o potássio de forma imediata e promove maior acúmulo total no solo, mas também é o mais suscetível à lixiviação em solos arenosos (Madeiros et al., 2014). As fontes Fonolito e Fonolito H. liberam o nutriente de maneira mais lenta, o que pode reduzir as perdas por lixiviação, aumentar a eficiência do uso do K e favorecer o fornecimento gradual às culturas.

CONCLUSÃO

A fontes e doses de K_2O influenciam de forma distinta a dinâmica do potássio e os atributos químicos do solo, tanto no curto quanto no longo prazo. O KCl, por ser uma fonte altamente solúvel, promoveu maior acúmulo imediato de K no solo, refletido nos maiores valores de K extraído, especialmente nas maiores doses, confirmando sua elevada eficiência de fornecimento rápido do nutriente. No entanto, esse comportamento também indica maior suscetibilidade a perdas por lixiviação, sobretudo em solos tropicais.

Por outro lado, os remineralizadores silicatados (Fonolito e Fonolito H.) apresentaram liberação gradual de K, resultando em menores valores absolutos de K acumulado nas extrações sequenciais, porém com maior estabilidade ao longo do tempo. Esse padrão evidencia maior equilíbrio, com potencial para maior eficiência de uso do K, menor competição iônica na CTC e efeitos positivos sobre atributos como Ca, Mg, SB, CTC e V%.

A avaliação ao longo de três anos de experimento demonstrou que, embora o KCl mantenha os maiores teores de K disponível, os remineralizadores contribuem para a manutenção da fertilidade química do solo, com efeitos residuais consistentes e menor impacto negativo sobre a disponibilidade de micronutrientes. Assim, o uso de fontes alternativas de K_2O , especialmente em doses adequadas, configura-se como estratégia viável para sistemas de produção que buscam sustentabilidade, eficiência nutricional e equilíbrio químico do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. 12º Congresso Brasileiro de Fertilizantes (CBFer), realizado em 2025. São Paulo: ANDA, 2025. Disponível em: https://anda.org.br/wp-content/uploads/2025/09/Apresentacao-CBFer-2025-Jose-Carlos-Polidoro.pdf?utm_source. Acesso em: 27 out. 2025.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. *Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2022*. São Paulo: ANDA, 2022. Disponível em: <https://anda.org.br>. Acesso em: 27 out. 2025.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. *Boletim informativo: desempenho do setor de fertilizantes – janeiro a maio de 2025*. São Paulo: ANDA, 2025. Disponível em: https://anda.org.br/wp-content/uploads/2025/08/Comentarios.pdf?utm_source. Acesso em: 27 out. 2025.

COSTA JÚNIOR, A. da; SANTOS, S. R. d.; PEREIRA, G. L.; SANTOS, W. O. **Glauconite as a potential source of potassium in Brazilian agriculture: a review**. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 55, e20238828, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/PzcLhqsqJsvxrv4zNyZDrpq/?format=html&lang=en>. Acesso em: 24 jun. 2026.

CRUZ, C. A. C. da; ORIOLI JÚNIOR, V.; BERNARDES, J. V. S.; SARGENTIM, M. M.; SILVA, G. A.; KOCHENBORGER, A. C. D. **Efficiency of phonolite as a potassium source for Paiaçu palisadegrass**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 51, p. e67857, 2021. DOI: **10.1590/1983-40632021v5167857**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/hDmqTzRHBG6cdZSqHSdbXsf/abstract/?lang=pt>.

DA ROCHA NETO, A. R. *Solubilização de pó de fonolito em Latossolo Vermelho*. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/3234923b-be4d-432c-a0d3-fa8a69ad3e66>.

DATAGRO. *Importação de fertilizantes no Brasil bate recorde para o mês de julho em meio a preços em alta*. *Notícias Agrícolas*, 18 ago. 2025. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/agronegocio/406022-datagro-importacao-de-fertilizantes-no-brasil-bate-recorde-para-o-mes-de-julho-em-meio-a-precos-em-alta.html>.

DUARTE, I. N.; KORNDÖRFER, G. H.; SANTOS, D. S. Rochagem com o fonolito para cana planta. In: II Congresso Brasileiro de Rochagem, 2013, Poços de Caldas (MG). Anais... Poços de Caldas (MG), p. 292-300, 2013. Disponível em: https://sgb.gov.br/remineralizadores/media/anais_IICbr_2013.pdf.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

FERREIRA, D. F. *SISVAR: a computer statistical analysis system*. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>.

FERREIRA, D. F. *SISVAR: a computer statistical analysis system. Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

GRANADA, C. E.; LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K. Editorial: Rocks, Plants and Microbes. *Front. Plant Sci.* v. 12, n. 745338, 2 p., 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.745338>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.745338/full> .

LUZ, P. H. DE C., PERES, C. E. B., YASUDA, M., FERRAZ, M. R., CASADEI, R. A., & LUNARDI, L. J. Avaliação do desempenho do fonolito via mineral e no enriquecimento da torta de filtro em soqueira de cana-de-açúcar. In *Anais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 2013. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002416650> .

MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.

GATTO, Alcides et al. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus* sp., no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 3, p. 879-887, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300019>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832014000300019&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 20 jul. 2020.

MORAES NETO, S. P. de.; MARTINS, E. de S. Comparação entre adubação com cloreto de potássio e dois tipos de rochas potássicas no crescimento de *Eucalyptus urophylla*. *Agropecuária Técnica*, p. 83-91, 2020. <https://doi.org/10.25066/agrotec.v41i3-4.50775> . Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/at/article/view/50775> .

NOGUEIRA, T.A.R.; MIRANDA, B.G.; JALAL, A.; LESSA, L.G.F.; FILHO, M.C.M.T.; MARCANTE, N.C.; ABREU-JUNIOR, C.H.; JANI, A.D.; CAPRA, G.F.; MOREIRA, A. Nepheline Syenite and Phonolite as Alternative Potassium Sources for Maize. *Agronomy* 2021, 11, 1385. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071385>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/7/1385> .

VOS, R.; GLAUBER, J.; HEBEBRAND, C.; RICE, B. Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. *Food Policy*, v. 133, 102790, maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102790>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030691922400201X?via%3Dihub> . Acesso em: 29 jun. 2026.

MEDEIROS, J. d. S. d.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; ARRUDA, J. A. d.; VIEIRA, M. d. S. Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 417-426, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000200025> SANTANA, A. J. P.; KLEIN, J.; SANTOS FILHO, O. C.; MENEZES, M. L. F. Remineralização de solo agrícola: estudo das alterações químicas decorrentes de

intemperismo acelerado. *Revista Aracê*, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 12227–12240, 2025. DOI: 10.56238/arev7n3-120. Disponível em:

<https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/3824>. Acesso em: 19 fev. 2026.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 19 fev. 2026.

SILVA, F. C.; ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; PEREIRA, H. S.; PAVAN, M. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ANDRADE, J. C.; BATAGLIA, O. C.; RAIJ, B. van; entre outros. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p. ISBN 978-85-7383-430-7.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; DE CAMPOS, M.; GILABEL, A. P.; DA COSTA, C. H. M.; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. *Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 56, e02686, 2021. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02686. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/SSMbJTjcdkqPDdbGj6CsPyn/?lang=en>. Acesso em: 19 fev. 2026.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. *Adubação e fertilização no estado de Minas Gerais*. Viçosa, MG: UFV, 2004. Disponível em: [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=566414&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22LOBATO,%20E.%20\(Ed.\).%22&qFacets=autoria:%22LOBATO,%20E.%20\(Ed.\).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=566414&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22LOBATO,%20E.%20(Ed.).%22&qFacets=autoria:%22LOBATO,%20E.%20(Ed.).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=566414&biblioteca=vazio&bu>

[sca=autoria:%22LOBATO,%20E.%20\(Ed.\).%22&qFacets=autoria:%22LOBATO,%20E.%20\(Ed.\).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1.](#)

SOUZA, F. N. da S.; AGUIAR NETO, C. A. M. de; ALVES, J. M. *Avaliação da solubilidade de um remineralizador e seus efeitos sobre a fertilidade do solo*. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas, v. 9, n. 2, p. 8, 2023. DOI: 10.36725/agries.v9i2.8670. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/article/view/8670>. Acesso em: 19 fev. 2026

SWOBODA, Philipp; DÖRING, Thomas F.; HAMER, Martin. *Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review*. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150976, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972106054X>. Acesso em: 19 fev. 2026

TAQUES, M. M. *Efeito de pó de basalto na disponibilidade de nutrientes em solo cultivado com milho*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Grande Dourados, 2024.

TOLEDO, F. H. S. F. *Crescimento, nutrição mineral e eficiência do uso da água em povoamento de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl*. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) — *Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba*, 2017. DOI: 10.11606/T.11.2017.tde-25072017-172323.SANTANA, A. J. P. et al. (2025). *Remineralização de solo agrícola: estudo das alterações químicas decorrentes de intemperismo acelerado*. *Revista Aracê*. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/download/3824/5008/14913>.

CAPÍTULO II:

OS REMINERALIZADORES COMO FONTE DE POTÁSSIO PODEM SUBSTITUIR O FERTILIZANTE KCl NA SOJA-MILHO?

RESUMO

O potássio (K) é essencial ao desenvolvimento vegetal, atuando na regulação osmótica, ativação enzimática e resistência a estresses abióticos. Tradicionalmente fornecido via cloreto de potássio (KCl), sua alta solubilidade pode ocasionar perdas por lixiviação e toxicidade por cloro. Como alternativa sustentável, remineralizadores como o fonolito e fonolito hidrotermalizado (Fonolito H.) liberam nutrientes de forma gradual, fornecendo K_2O , melhorando a estrutura e a retenção de água no solo. O objetivo com este estudo foi avaliar o efeito dessas fontes de K nas características agrônomicas e nutricionais de soja e milho em sucessão. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) nas safras 2021/22 e 2022/23 para a soja e nas safras 2022 e 2023 para o milho, em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 5×3 , com 15 tratamentos e 4 repetições, totalizando 60 unidades experimentais, sendo: 5 doses de K_2O (0, 25, 50, 75 e 100% da dose recomendada de K_2O , sendo 0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O) com 3 fontes de K [cloreto de potássio (60% de K_2O), Fonolito (8% de K_2O /25% de Si) Fonolito Hidrotermalizado (12% de K_2O /25% de Si)]. Foram avaliados teores foliares de nutrientes e produtividade de grãos. A nutrição e a produtividade das culturas foram afetadas pelas condições climáticas, fontes e doses de K_2O . Na safra 2021/22, o déficit hídrico reduziu o rendimento da soja, destacando-se o Fonolito H. como a fonte mais eficiente. Em 2022/23, com melhor regime hídrico, KCl e Fonolito H proporcionaram produtividades superiores a 2000 kg ha⁻¹. O fonolito apresentou desempenho inferior, devido à liberação mais lenta de nutrientes. Houve antagonismo entre K, Ca e Mg nas maiores doses e teores adequados Zn, Mn e Fe. No milho, as fontes de K_2O não diferiram significativamente em produtividade, indicando que os remineralizadores podem substituir o KCl sem prejuízo de rendimento.

Palavras-chave: Agricultura Regenerativa; Fonolito; Adubação potássica

CHAPTER II:

CAN REMINERALIZERS AS A POTASSIUM SOURCE REPLACE KCl FERTILIZER?

ABSTRACT

Potassium (K) is essential for plant development, acting in osmotic regulation, enzymatic activation, and tolerance to abiotic stresses. Traditionally supplied through potassium chloride (KCl), its high solubility may lead to leaching losses and chloride toxicity. As a sustainable alternative, remineralizers such as phonolite and hydrothermally treated phonolite (Phonolite H.) release nutrients gradually, supplying K_2O , and improving soil structure and water retention. The objective of this study was to evaluate the effect of these K sources on the agronomic and nutritional characteristics of soybean and maize grown in succession. The experiment was carried out at the Experimental Farm of Agrarian Sciences (FAECA) of the Federal University of Grande Dourados (UFGD) during the 2021/22 and 2022/23 growing seasons for soybean, and during the 2022 and 2023 seasons for maize. A randomized block design was used in a 5×3 factorial arrangement, with 15 treatments and 4 replications, totaling 60 experimental units. Treatments consisted of five K_2O doses (0, 25, 50, 75, and 100% of the recommended K_2O dose, corresponding to 0, 25, 50, 75, and 100 kg ha⁻¹ of K_2O) combined with three K sources [potassium chloride (60% K_2O), phonolite (8% K_2O / 25% Si), and hydrothermally treated phonolite (12% K_2O / 25% Si)]. Foliar nutrient concentrations and grain yield were evaluated. Crop nutrition and yield were influenced by climatic conditions, K_2O sources, and application doses. In the 2021/22 season, water deficit reduced soybean yield, with Phonolite H. standing out as the most efficient source. In 2022/23, under improved water availability, both KCl and Phonolite H. produced yields above 2000 kg ha⁻¹. Phonolite showed lower performance due to its slower nutrient release. Antagonism among K, Ca, and Mg occurred at the highest doses, while Zn, Mn, and Fe levels remained adequate. In maize, K_2O sources did not differ significantly in yield, indicating that remineralizers can replace KCl without yield loss.

Keywords: Regenerative agriculture; Phonolite rock Dust; Potassium fertilization

INTRODUÇÃO

O potássio (K) é um dos nutrientes fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, desempenhando papéis vitais em diversos processos fisiológicos e bioquímicos. Sua principal importância na nutrição vegetal manifesta-se em funções críticas como regulação osmótica, ativação de enzimas, transporte de açúcares, síntese de proteínas e aumento da resistência a estresses abióticos, como seca e frio (Marschner, 2012).

Dentre essas funções, destaca-se sua contribuição para a regulação osmótica das células vegetais. O K atua diretamente no controle de abertura e fechamento dos estômatos, estruturas essenciais para a transpiração e para a absorção de CO₂ durante a fotossíntese (Taiz; Zeiger, 2017). O potássio também participa ativamente do transporte de nutrientes e fotoassimilados, favorecendo o deslocamento de carboidratos das folhas para órgãos de reserva, o que é decisivo para culturas como soja e milho (Cakmak, 2005). Além disso, o K atua como cofator enzimático em diversos processos metabólicos essenciais, incluindo reações relacionadas à fotossíntese e ao metabolismo do nitrogênio (Marschner, 2012).

A principal fonte agrícola de potássio é o cloreto de potássio (KCl), que apresenta elevada concentração de K₂O. Entretanto, o KCl pode provocar aumento da salinidade do solo, maior condutividade elétrica e potenciais efeitos osmóticos negativos, resultando em estresse fisiológico e possível toxicidade em plantas sensíveis, especialmente em condições de baixa umidade (Oliveira et al., 2024). Nesse contexto, cresce o interesse por fontes alternativas mais sustentáveis, como remineralizadores de solo ricos em potássio.

Entre esses materiais destaca-se o fonolito, rocha com grande representatividade no planalto de Poços de Caldas, contendo cerca de 8% de K₂O e 7% de Na₂O. A versão hidrotermalizada apresenta teores ainda maiores (10-14% de K₂O) devido a alterações mineralógicas que enriquecem microclínio (CPRM, 1978; Neumann, 2002). Pesquisas indicam que o fonolito apresenta potencial como fonte alternativa de K, com liberação lenta do nutriente, redução de perdas por lixiviação e fornecimento adicional de silício (Santos et al., 2020; Pedro, 2024).

Estudos recentes também destacam que remineralizadores derivados de rochas ígneas alcalinas podem melhorar a fertilidade do solo, aumentar a disponibilidade de cátions básicos e favorecer a estabilidade estrutural ao longo do tempo (Nogueira et al., 2021). A liberação

gradativa dos nutrientes contribui para sistemas agrícolas mais resilientes, além de reduzir a dependência de fontes solúveis.

Outra linha de pesquisa reforça a importância desses materiais para a sustentabilidade ambiental. O uso agrícola de rochas moídas pode contribuir para o sequestro de carbono inorgânico no solo, por meio do intemperismo acelerado e da formação de carbonatos, representando estratégia eficiente para mitigar emissões de CO₂ (RIBEIRO et al., 2025). Tais efeitos são marcantes em regiões tropicais, onde as altas taxas de intemperismo aceleram processos geoquímicos e disponibilização nutricional.

Estudos recentes têm demonstrado o potencial de minerais de origem ígnea como fontes alternativas de potássio na agricultura, destacando especialmente o fonolito e o sienito nefelínico. Pesquisas realizadas por Nogueira et al. (2021) evidenciaram que esses materiais liberam potássio de forma gradual no solo, contribuindo para o fornecimento mais contínuo do nutriente quando comparados ao KCl, fonte tradicional altamente solúvel. Essa liberação lenta favorece sistemas de produção de médio e longo prazo, reduzindo riscos de perdas por lixiviação e aumentando a eficiência no uso do nutriente pelas plantas. No estudo conduzido com a cultura do milho, os autores observaram melhorias na absorção de K e produtividades satisfatórias, indicando que esses minerais podem atuar como alternativas sustentáveis ou complementares às fontes convencionais de potássio, alinhando-se a estratégias de manejo agrícola mais resilientes e de menor impacto ambiental.

Santos et al. (2025) demonstram ainda que o fonolito promove efeitos positivos no desempenho fisiológico das plantas, aumentando eficiência fotossintética, absorção de nutrientes e produtividade agrícola, principalmente quando associado a manejos conservacionistas. Sua estabilidade química favorece a disponibilização contínua de K e Si, reforçando sua aplicabilidade em sistemas agrícolas regenerativos.

Outro benefício relevante da utilização do fonolito e do fonolito hidrotermalizado é sua capacidade de melhorar atributos físicos do solo, como agregação e porosidade, contribuindo para maior retenção de água e melhor desenvolvimento radicular (Oliveira et al., 2018). Além disso, seu teor de silício pode aumentar o crescimento vegetal, a resistência a doenças, o estresse hídrico e salino, sendo considerado insumo ambientalmente limpo (Haynes, 2017; Jazen, 2019; Dias et al., 2022).

Diante do exposto, objetivou-se estudar o efeito da utilização de remineralizadores de solo como fonte de potássio e KCl sobre características agronômicas e nutricionais da soja e do milho em sucessão.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no município de Dourados/MS com as seguintes coordenadas geográficas (Latitude 22°13'52,4495" S, Longitude 54°59'10,5372" W e altitude de 411,75 m). O experimento foi realizado em campo nas safras 2021/22 e 2022/23 para a cultura da soja e nas safras 2022 e 2023 para a cultura do milho.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2018) e a análise dos atributos químicos solo foi determinada antes da instalação do experimento, segundo metodologia proposta por Silva et al. (2009), na camada de 0-20 cm: pH(CaCl₂)=5,1; P(Mehlich-1) e S (mg dm⁻³)=15,55 e 11,95; Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CTC (cmol_c dm⁻³)=4,54; 2,24; 0,37; 0,00; 3,63; 7,15 e 10,78; V%=66%, já para a camada de 20-40 cm: pH(CaCl₂)=5,0; P(Mehlich-1) e S (mg dm⁻³)=9,45 e 41,70; Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CTC (cmol_c dm⁻³)=3,45; 1,59; 0,19; 0,00; 4,24; 5,23 e 9,47; V%=55%, com granulometria de 58% de argila, 29% de areia e 13% de silte.

Durante a condução da primeira safra de soja (2021/22) a temperatura média diária ficou próxima dos 25,26°C (Figura 1). Na safra seguinte (2022/23) a temperatura média foi de 24,62°C, sendo esta considerada ideal para o desenvolvimento da cultura da soja. Segundo dados da Embrapa (2010) a faixa de temperatura ideal para a soja está entre 20 e 35°C.

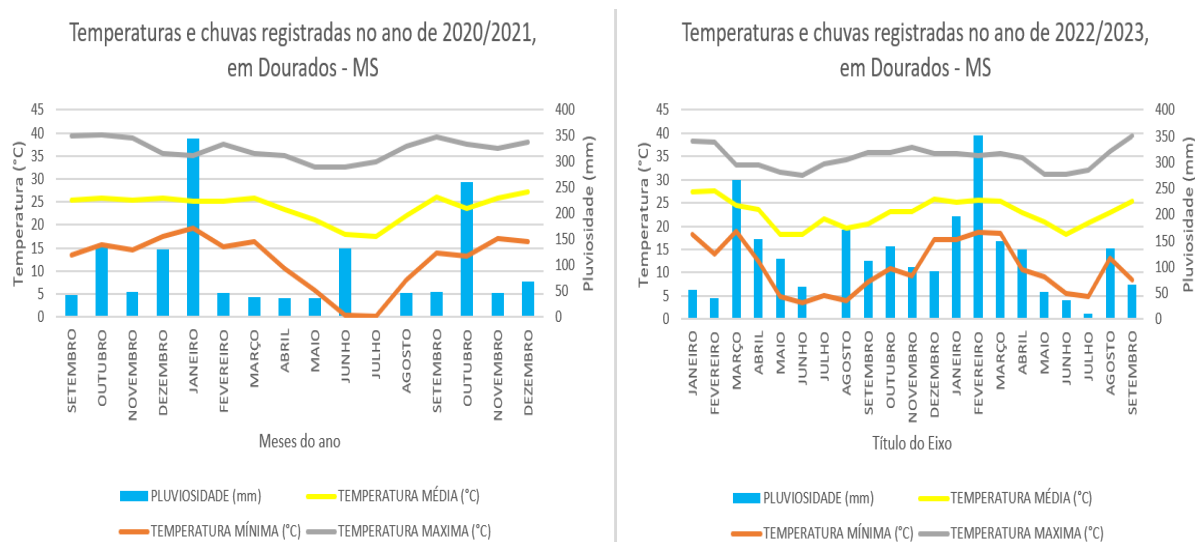


Figura 1. Valores de precipitação pluvial mensal e temperaturas máxima, mínima e média durante condução do experimento soja com sucessão milho nas safras 21/22 e 22/23.

Fonte: Embrapa (https://clima.cpao.embrapa.br/?lc=site/banco-dados/base_dados).

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados num esquema fatorial 5 x 3, com 15 tratamentos e 4 repetições, totalizando 60 unidades experimentais, sendo: 5 doses de K₂O (0, 25, 50, 75 e 100% da dose recomendada de K₂O, ou seja, 0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O) com 3 fontes de potássio: cloreto de potássio (60% de K₂O), Fonolito (8% de K₂O/25% de Si/1% de Ca/0,5% de Mg/0,001% de Zn/0,0004% de Co/0,15% de Mn) e Fonolito H. (12% de K₂O/25% de Si/0,10% de Ca/0,10% de Mg/0,01% de Zn/0,001% de Co/0,15% de Mn)]. A dimensão das parcelas foi de 12 m de comprimento com área útil de 4 linhas com espaçamento entre linhas de 0,45 m.

Com base na análise dos atributos químicos do solo foi realizada a adubação mineral de semeadura na cultura da soja, aplicando-se 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de MAP na cultura da soja nas safras 2021/22 e 2022/23. As fontes de K₂O (KCl, Fonolito e Fonolito H.) foram aplicadas a lanço e sem incorporação, manualmente, em área total 10 dias antes da semeadura. No dia 05/11/2021 (safra 2021/22) e no dia 26/10/2022 (safra 2022/23) realizou-se a semeadura da soja com sementes (HO Pirapó IPRO) inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum Brasiliense*. Para a cultura da soja foram realizados todos os tratos culturais com herbicida, inseticida e fungicida sempre que necessários.

No dia 22/03/2022 (safra 2022) e no dia 31/03/2023 (2023). Na safra 2022 foi utilizada sementes do híbrido B2612 PWU e na safra 2023 foi utilizada sementes do híbrido B2620PWU. inoculadas com *Azospirillum Brasiliense*. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada com 100 kg ha⁻¹ de N via fonte ureia entre os estádios vegetativos V4 e V6 nas duas safras. Para a cultura do milho foram realizados todos os tratos culturais com herbicida, inseticida e fungicida sempre que necessários.

Para a determinação da concentração de alguns macronutrientes sendo eles (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Cu, Mn, Fe e Zn), na cultura da soja foi coletado o terceiro trifólio de cima para baixo no florescimento pleno e, para a cultura do milho, foi coletado o terço médio de 20 folhas da inserção da espiga de milho principal, no florescimento feminino das plantas, segundo a metodologia descrita em Cantarella et al. (1997). Para a cultura do milho, neste momento também foi feita a leitura do valor SPAD, utilizando-se o modelo SPAD-502-PLUS (GIL et al., 2002).

Na maturação fisiológica da soja, foi medida a altura média de 10 plantas, definida como sendo à distância (m) do nível do solo ao ápice da planta.

Na ocasião da colheita, foram coletadas 10 plantas de soja representativas para a medição e contagem do: a) altura de inserção da primeira vagem, b) número de vagens por planta, c) número de grãos por planta.

A produtividade de grãos foi determinada pela coleta das plantas contidas nas 4 linhas úteis de cada parcela. Após a trilha mecânica, os grãos foram quantificados e os dados transformados em kg ha^{-1} a 13% (base úmida).

Na ocasião da colheita da cultura do milho, foram coletadas 10 plantas de milho representativas para a medição de contagem do: a) tamanho de espiga, b) número de fileiras por espiga, c) número de grãos por fileira de espiga, d) número de grãos por espiga.

A produtividade de grãos foi determinada pela coleta das plantas contidas nas 4 linhas úteis de cada parcela. Após a trilha mecânica, os grãos foram quantificados e os dados transformados em kg ha^{-1} a 13% (base úmida).

Os dados obtidos foram submetidos aos testes preliminares de normalidade e homocedasticidade. Após isto, os resultados foram analisados pela análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação de médias das fontes de potássio, e ajustadas a equações de regressão para o efeito das doses de K_2O , utilizando-se o programa SISVAR (Ferreira, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Soja safra 2021/22

A interação fontes x doses de K₂O somente foi significativa para a altura de plantas (Tabelas 1 e 2). As fontes de K₂O influenciaram apenas a produtividade, a soja fertilizada com Fonolito H. foi a que mais produziu (1352,83 kg ha⁻¹), sendo 261,55 kg ha⁻¹ (4,4 sacas) a mais que a fertilizada com Fonolito e 335 kg ha⁻¹ (6 sacas) a mais que a soja fertilizada com KCl. As doses de K₂O interferiram no número de vagens e número de grãos por planta (Tabela 1). As baixas produtividades devem-se ao período de falta de água próximo ao enchimento dos grãos (Figura 1).

Tabela 1. Altura de plantas, altura de inserção da 1ª vagem, número de vagens por planta, número de grãos por planta e produtividade da cultura da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K₂O)

Tratamentos FonU9CVLÇGG GGGGÇFB'-tes de K ₂ O	Altura de plantas (cm)	Altura de inserção da 1ª vagem	Nº de vagens por Planta	Nº de grãos por planta	Produtividade kg ha ⁻¹
KCl	74,2	19,5 a	39,1 a	89,4 a	1017,83 b
Fonolito	78,8	18,9 a	40,8 a	93,8 a	1091,28 b
Fonolito H.	76,5	19,7 a	39,8 a	90,0 a	1352,83 a
DMS	2,9	1,0	5,2	0,5	174,13
Doses de K₂O kg ha ⁻¹					
0	73,8	18,7 ^{ns}	40,7 ¹	93,3 ²	1222,87 ^{ns}
25	72,8	19,3	37,6	88,4	1132,22
50	75,3	19,3	37,2	78,7	1142,22
75	79,3	19,4	39,5	95,7	1063,15
100	81,3	20,1	44,5	99,3	1209,44
CV (%)	5,0	6,77	17,1	15,1	19,6
Média	76,5	19,4	39,9	91,1	1153,98

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Número de vagens por planta = $40,70 - 0,18x + 0,002x^2$ R²=0,61

² Número de grãos por planta = $93,4751 - 0,4220x + 0,0050x^2$ R²=0,68

O fonolito H. se sobressaiu ao KCl, pode ser, por ter liberação de K mais gradual, garantindo a presença do elemento durante todo o ciclo da cultura, além de ter a presença silício que já tem resultados significativos importantes e consolidados por outras pesquisas. Como pesquisas feitas por Soratto (2022) têm demonstrado que fontes silicáticas e remineralizadores podem promover melhorias na fertilidade do solo e na eficiência de uso de nutrientes, com efeitos residuais positivos na produtividade de culturas como a soja e o milho, em comparação

com as fontes tradicionais de potássio. Além disso, a aplicação de fertilizantes à base de silício tem sido associada a aumentos no crescimento vegetativo, maior tolerância à deficiência hídrica e estresses abióticos em soja, destacando seu potencial agrônomo (Santos et al., 2024).

A utilização do fonolito como fonte alternativa de potássio, tem se mostrado promissora para diversas culturas. De acordo com Soratto et al. (2021a), ao observarem o efeito de doses (0, 20, 40 e 80 kg ha⁻¹ de K₂O) e das fontes de potássio em Latossolo Vermelho distroférico com teor de K no solo de 0,14 cmol_c dm⁻³, concluíram que a produtividade de grãos para cultura do feijão e arroz de terras altas foram similares àquelas obtidas com o uso do KCl.

Soratto et al. (2021b), em outra pesquisa testaram o efeito de fontes (KCl, fonolito e rocha potássica calcinada) e doses de potássio (0, 25, 50 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O) na cultura da soja e do milho, em Latossolo Vermelho distroférico, com teor de K no solo de 0,14 e 0,12 cmol_c dm⁻³, respectivamente, e concluíram que as fontes alternativas de potássio apresentaram produtividades equivalentes àquelas alcançadas pela fonte KCl. Além disso, o fonolito e a rocha potássica calcinada causarem efeitos residuais maiores e mais eficientes que os do KCl, nas culturas cultivadas um ano após sua aplicação e sob doses de K superiores às recomendadas para as culturas.

Observou-se efeito das doses de K₂O para o número de vagens por planta e número de grãos por plantas, com ponto de mínimo com a dose de 45,0 e 42,2 kg ha⁻¹, respectivamente, para número de vagens por planta e número de grãos por plantas (Tabela 1).

A média de altura de inserção da 1ª vagem foi de 19,4 cm, indicando que não houve limitação de colheita mecanizada. De acordo com Medina (1994), a altura de inserção da primeira vagem de soja é uma característica agrônoma importante à operação de colheita mecânica dos grãos. Sendo que essa variável deve ser de no mínimo 13 cm, para que se reduza as perdas durante a colheita (Queiroz et al., 1981).

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a altura de plantas, observou-se que para o KCl e para o Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O, à medida que aumentaram as doses de K₂O, aumentaram a altura de plantas. Para as fontes de K₂O, observou-se que na dose 50 e 75 kg ha⁻¹ de K₂O as fontes não diferiram entre si, para a dose de 0 kg ha⁻¹ a maior altura de plantas foi obtida com Fonolito; para a dose 25 kg ha⁻¹ de K₂O, a maior altura de plantas foi obtida com o Fonolito e não diferindo do KCl e para a dose 100 kg ha⁻¹ de K₂O, a maior altura de plantas foi obtida com o Fonolito H. não diferindo do KCl. A média da altura de plantas foi de 76,5 cm, muito próximo ao valor de altura de plantas (80 cm), caracterizado para a cultivar HO Pirapó IPRO.

De acordo com Moraes e colaboradores, o objetivo do estudo foi avaliar o uso dos produtos Ekosil e Potasil como fontes alternativas de potássio em comparação ao Cloreto de Potássio (KCl), analisando seus efeitos sobre a produtividade da cultura da soja. Para as variáveis altura de plantas e diâmetro do coleto, não foram observadas diferenças significativas entre as fontes (KCl, Potasil e Ekosil) nem entre as doses aplicadas (0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). A altura das plantas variou de 87,85 cm no tratamento testemunha a 93,36 cm na dose de 200 kg ha⁻¹ de potássio, enquanto o diâmetro do coleto apresentou valores entre 7,45 mm (150 kg ha⁻¹) e 8,23 mm (testemunha).

Tabela 2. Desdobramento da interação fontes com doses de potássio (K₂O) para a altura de plantas de soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Altura de plantas (cm)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	68,8 ¹ b	80,5 ^{ns} a	69,1 ² b
25	71,3 ab	77,3 a	72,8 b
50	74,0 a	76,3 a	76,5 a
75	76,9 a	81,3 a	80,2 a
100	79,9 ab	78,5 b	83,9 a
DMS		6,57	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Altura de Plantas KCl = 68,6500 + 0,1110x R²=0,99

² Altura de Plantas Fonolito H. = 69,1000 + 0,1480x R²=0,86

A interação entre fontes e doses de K₂O apresentou efeito significativo para a concentração de todos os macronutrientes, com exceção do Mg (Tabela 3). Esse resultado indica que, independentemente da fonte e da dose de K₂O aplicada, os teores foliares de Mg permaneceram estáveis, com média de 4,67 g kg⁻¹. De acordo com Souza e Lobato (2004), essa concentração encontra-se dentro da faixa de suficiência para a cultura, sugerindo que o fornecimento de K não comprometeu o estado nutricional de Mg nas plantas.

Esse comportamento pode estar associado à boa disponibilidade inicial de Mg no solo, o que teria reduzido a competição iônica entre K⁺ e Mg²⁺. É amplamente relatado na literatura que altas doses de K podem induzir antagonismo com Mg e Ca, em razão da competição pelos mesmos sítios de absorção radicular (Marschner, 2012; Malavolta et al., 1997). No entanto, no presente estudo, esse efeito não foi evidenciado, possivelmente em função do equilíbrio nutricional do solo ou da capacidade das fontes de K₂O em liberar o nutriente de forma gradual,

sem provocar desequilíbrios significativos. Assim, os resultados indicam que, nas condições experimentais, a adubação potássica, independentemente da fonte utilizada, não afetou a absorção e a concentração de Mg foliar, mantendo-se em níveis adequados para o bom desenvolvimento da cultura.

Tabela 3. Concentração de macronutrientes na cultura da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K₂O)

Tratamentos	N	P	K g kg ⁻¹	Ca	Mg
Fontes de K₂O					
KCl	41,23	0,32	35,15	16,75	4,67 a
Fonolito	37,11	0,35	29,30	16,92	4,83 a
Fonolito H.	40,51	0,36	29,10	12,95	4,52 a
DMS	4,05	0,04	4,46	2,05	0,41
Doses de K₂O kg ha⁻¹					
0	34,53	0,32	28,50	17,43	5,00 ^{ns}
25	36,17	0,36	33,25	14,76	4,60
50	44,22	0,34	30,33	14,97	4,65
75	41,22	0,34	31,92	15,57	4,61
100	41,93	0,34	31,92	14,98	4,51
CV (%)	13,30	16,00	18,60	17,15	11,35
Média	39,61	0,34	31,18	15,54	4,67

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A interação entre fontes e doses de K₂O foi significativa para a concentração de N foliar (Tabela 4). Observou-se efeito quadrático das doses de K₂O para o KCl e o Fonolito, com pontos de máxima estimados em 56,81 e 71,86 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. Esse comportamento indica que, até determinado nível de adubação potássica, houve incremento na absorção e acúmulo de N foliar, seguido de estabilização ou decréscimo em doses superiores, possivelmente em função de desequilíbrios nutricionais.

No desdobramento das fontes, verificou-se que, na ausência de adubação potássica (dose 0), o KCl e o Fonolito H. proporcionaram maiores concentrações de N foliar, enquanto nas demais doses não foram observadas diferenças significativas entre as fontes. Esse resultado sugere que, em condições de baixo fornecimento de K, a natureza da fonte pode influenciar a absorção de N, porém, com a adição crescente de K₂O, esse efeito tende a se diluir.

A média geral de N foliar foi de 39,61 g kg⁻¹, valor abaixo da faixa de suficiência de 44 a 55 g kg⁻¹, conforme proposto por Souza e Lobato (2004). Esse resultado evidencia que, mesmo com o manejo de K, as plantas apresentaram deficiência relativa de N, o que pode ter limitado seu desempenho produtivo. Tal comportamento pode estar associado à disponibilidade de N no solo, à competição iônica entre K⁺ e NH₄⁺ ou ainda a limitações na absorção e redistribuição do nutriente na planta (Marschner, 2012; Malavolta et al., 1997). Portanto, embora as fontes e doses de K₂O tenham influenciado o acúmulo de N foliar, os teores médios permaneceram abaixo do nível adequado, indicando a necessidade de atenção ao manejo do nitrogênio no sistema produtivo avaliado.

Tabela 4. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a concentração de nitrogênio (N) foliar para a cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	N foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	36,87 ¹ a	23,33 ¹ b	43,40 ^{ns} a
25	40,25 a	36,75 a	31,50 a
50	48,53 a	43,05 a	41,07 a
75	39,55 a	40,25 a	43,87 a
100	40,95 a	42,15 a	42,70 a
DMS		9,05	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Nitrogênio no solo KCl = 36,7041 + 0,2725x - 0,0024x² R²=0,97

² Nitrogênio na planta Fonolito = 24,2888 + 0,5318x - 0,0037x² R²=0,93

A interação entre fontes e doses de K₂O para a concentração de P foliar não apresentou efeito significativo em relação às doses, independentemente da fonte utilizada (Tabela 5). No entanto, na dose de 25 kg ha⁻¹ de K₂O, verificou-se diferença entre as fontes, sendo que o KCl proporcionou a maior concentração de P, embora sem diferença estatística em relação ao Fonolito. Esse resultado sugere que a disponibilidade de P não foi fortemente influenciada pelo incremento nas doses de K₂O, mas pode ter passado por pequenas variações em função da natureza da fonte utilizada.

A concentração média de P foliar foi de 16,00 g kg⁻¹, valor bastante superior à faixa de suficiência descrita por Souza e Lobato (2004), que varia de 2,5 a 5,0 g kg⁻¹. Esse excesso pode estar relacionado a condições edáficas favoráveis à disponibilidade do nutriente, ou ainda a

possíveis efeitos de concentração devido ao crescimento das plantas. Níveis foliares elevados de P, embora garantam o suprimento do nutriente, podem ocasionar interações antagônicas com outros elementos, especialmente micronutrientes como Zn e Fe, reduzindo sua absorção (Marschner, 2012).

Assim, os resultados indicam que a adubação potássica, em termos de fontes e doses, não foi determinante para o acúmulo de P nas folhas. No entanto, o teor médio muito acima da faixa de suficiência sugere que a cultura pode ter recebido aporte elevado do nutriente no solo ou que as plantas apresentaram alta eficiência na absorção de P, o que deve ser considerado no manejo para evitar desequilíbrios nutricionais.

Tabela 5. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para a concentração de fósforo (P) foliar para a cultura da soja safra 2021/22

Doses de K_2O $kg\ ha^{-1}$	P foliar ($g\ kg^{-1}$)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	0,32 ^{ns} a	0,30 ^{ns} a	0,33 ^{ns} a
25	0,44 a	0,35 ab	0,30 b
50	0,37 a	0,31 a	0,35 a
75	0,30 a	0,33 a	0,39 a
100	0,35 a	0,32 a	0,36 a
DMS			

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K_2O para a concentração de K foliar, não foi observado efeito significativo entre as doses, nas 3 fontes de K_2O . No entanto, para as fontes de K_2O , observou-se somente na dose 25 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O diferença, sendo que o Fonolito apresentou a menor concentração de K (Tabela 6).

A concentração média de K foliar foi de 31,18 $g\ kg^{-1}$, valor acima da faixa de suficiência estabelecida por Souza e Lobato (2004), que varia de 17 a 25 $g\ kg^{-1}$. Esse resultado indica que, de forma geral, as plantas apresentaram bom suprimento potássico, não sendo limitadas pela disponibilidade do nutriente. Teores acima da faixa de suficiência podem refletir a alta absorção de K, característica das culturas, uma vez que o potássio não se acumula em formas orgânicas complexas, permanecendo em solução no vacúolo e nos tecidos vegetais (Marschner, 2012).

Assim, verifica-se que, embora as doses de K_2O não tenham promovido diferenças significativas nos teores foliares de K, as plantas mantiveram concentrações acima da faixa de

suficiência, evidenciando adequada disponibilidade do nutriente no sistema. O menor desempenho do Fonolito na dose de 25 kg ha⁻¹ reforça sua característica de liberação gradual, a qual pode não atender plenamente à demanda imediata da cultura em condições de menor aporte de K.

Tabela 6. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	K foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	28,50 ^{ns} a	30,00 ^{ns} a	27,00 ^{ns} a
25	45,25 a	30,75 b	23,75 b
50	36,25 a	26,75 a	28,00 a
75	30,25 a	29,75 a	35,75 a
100	35,50 a	29,25 a	31,00 a
DMS			

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Soratto et al. (2021a) ao avaliarem o efeito de doses (0, 20, 40 e 80 kg ha⁻¹ de K₂O) e fontes de potássio em Latossolo Vermelho distroférico com teor de K no solo de 0,14 cmol_c dm⁻³, verificaram que em média, todas as fontes forneceram valores dentro da faixa recomendada para as culturas avaliadas, variando de 20 a 24 g kg⁻¹ para feijão comum e 13 a 30 g kg⁻¹ para arroz de terras altas (Raij et al., 1997), enquanto o tratamento controle (sem aplicação de K) resultou em concentrações foliares de K abaixo das faixas recomendadas.

De acordo com Soratto et al. (2021b) ao usar os tratamentos de três fontes (KCl, rochas potássico-silicáticas alcalinas fundidas e moídas (K1) e de rocha de fonolito moída (K2), e quatro doses de K (correspondentes a 0, 0,5, 1,0 e 2,0 vezes a dose recomendada para a cultura da soja e do milho), concluíram que as fontes não afetaram a concentração de K nas folhas da soja, mas o KCl e o K2 aumentaram de forma semelhante a concentração de K nas folhas do milho e independentemente das fontes avaliadas, a aplicação de K aumentou as produtividades de todas as culturas de maneira significativa. O efeito das doses de fertilizantes de K na concentração de K nas folhas da soja pode estar relacionado à concentração média de K no solo (Raij et al., 1997), à liberação de K pela mineralização da palha (Rosolem et al., 2006) e à redução da absorção de K pela cultura até a fase de floração (Gaspar et al., 2017).

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para a concentração de Ca foliar, não foi observado efeito significativo entre as doses, nas 3 fontes de K_2O , no entanto, para as fontes de K_2O , observou-se que na dose 0 kg ha⁻¹ de K_2O , maiores concentrações de Ca com KCl e Fonolito, para a dose 25 kg ha⁻¹ de K_2O , maior concentração de Ca para o KCl, para a dose 50 kg ha⁻¹ de K_2O , maior concentração de N para o Fonolito; para a dose 75 kg ha⁻¹ de K_2O , maior concentração de Ca com o KCl não diferindo do Fonolito e para a dose 100 kg ha⁻¹ de K_2O , maior concentração de Ca para o Fonolito (Tabela 7).

A concentração média de Ca foliar foi de 15,54 g kg⁻¹, valor que se encontra dentro da faixa de suficiência proposta por Souza e Lobato (2004), entre 4 e 20 g kg⁻¹. Isso indica que, de modo geral, as plantas mantiveram adequado suprimento de Ca, independentemente da dose e da fonte de K utilizada. Do ponto de vista nutricional, sabe-se que há uma interação antagônica entre K⁺ e Ca²⁺, em razão da competição pelos mesmos sítios de absorção radicular (Marschner, 2012). No entanto, esse efeito não se manifestou de forma clara no presente estudo, visto que os teores de Ca permaneceram adequados e as variações observadas entre fontes e doses foram pontuais. É possível que a disponibilidade inicial de Ca no solo tenha contribuído para reduzir o impacto da adubação potássica sobre sua absorção.

Dessa forma, os resultados demonstram que as plantas atenderam suas exigências nutricionais de Ca, e que a adubação potássica, mesmo em diferentes fontes e doses, não comprometeu o estado nutricional desse nutriente.

Tabela 7. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para a concentração de cálcio (Ca) foliar para a cultura da soja safra 2021/22

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	Ca foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	19,50 ^{ns} a	19,06 ^{ns} a	13,71 ^{ns} b
25	18,47 a	12,30 b	13,51 b
50	13,44 b	19,15 a	12,33 b
75	18,45 a	14,75 ab	13,52 b
100	13,91 b	19,37 a	11,67 b
DMS			

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A interação fontes $\times$ doses de K_2O foi significativa para a concentração de Cu e Zn (Tabela 8), evidenciando que tanto a natureza da fonte quanto o nível de adubação potássica influenciaram a disponibilidade e absorção desses micronutrientes. Esse resultado está de acordo com relatos da literatura, que destacam a possibilidade de interações entre o K e

micronutrientes catiônicos, como Cu^{2+} e Zn^{2+} , em função da competição por sítios de absorção radicular (Marschner, 2012).

Tabela 8. Concentração de micronutrientes na cultura da soja safra 2021/22 fertilizada com fontes e doses de potássio (K_2O)

Tratamentos	Cu	Mn	Fe	Zn
Fontes de K_2O			mg kg ⁻¹	
KCl	10,27	76,13 a	255,37 a	41,62
Fonolito	9,43	73,98 a	196,68 b	38,63
Fonolito H.	9,06	74,91 a	215,68 ab	36,82
DMS	1,33	8,53	54,44	4,13
Doses de K_2O kg ha⁻¹				
0	9,39	77,27 ^{ns}	254,28 ¹	39,52
25	9,15	73,40	238,42	37,75
50	9,21	74,00	222,57	38,49
75	9,79	78,84	206,71	40,68
100	10,40	71,51	190,86	38,70
CV (%)	18,07	14,80	31,83	13,76
Média	9,60	75,00	222,57	39,03

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{Fe na planta} = 254,2802 - 0,6342x \quad R^2=0,78$$

Por outro lado, as concentrações de Mn não foram influenciadas pelas fontes e doses de K_2O , apresentando média de 75,00 mg kg⁻¹ de Mn foliar. Segundo Souza e Lobato (2004), esse valor está dentro da faixa de suficiência para a cultura, indicando que o suprimento de Mn foi adequado e não foi comprometido pela adubação potássica. Esse comportamento pode estar relacionado à elevada disponibilidade do nutriente no solo, o que reduz os efeitos competitivos com o K^+ .

No caso do Fe, observou-se maior concentração foliar com a utilização do KCl, embora sem diferença em relação ao Fonolito H. Além disso, verificou-se que o aumento das doses de K_2O resultou em redução progressiva dos teores de Fe foliar. Esse efeito sugere antagonismo entre o K^+ e o $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, fenômeno já descrito por Malavolta et al. (1997), em que doses elevadas de K podem limitar a absorção de Fe, reduzindo seus níveis nos tecidos vegetais. Ainda assim, as concentrações médias de Fe permaneceram dentro da faixa de suficiência proposta por Souza e Lobato (2004), indicando que, apesar da tendência de decréscimo com o aumento das doses de K, não houve deficiência do nutriente.

De forma geral, observa-se que a adubação potássica modulou o acúmulo de Cu, Zn e Fe, mas não interferiu na absorção de Mn. As concentrações médias de Mn e Fe permaneceram dentro da faixa de suficiência, assegurando adequado suprimento nutricional. No entanto, a redução nos teores de Fe com o aumento das doses de K₂O evidencia a importância de um manejo equilibrado, a fim de evitar desequilíbrios nutricionais decorrentes de interações antagônicas.

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K₂O para a concentração de Cu foliar, foi observado efeito significativo entre as doses somente para quando utilizou-se o Fonolito, com ponto de mínimo atingido com a dose de 42,61 kg ha⁻¹ de K₂O. Esse resultado sugere que doses intermediárias de K₂O reduziram a absorção de Cu, possivelmente em razão da competição iônica entre K⁺ e Cu²⁺ pelos sítios de absorção radicular (Tabela 9).

Tabela 9. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a concentração de cálcio (Cu) foliar para a cultura da soja safra 2021/22

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Cu foliar (mg kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	9,82 ^{ns} a	9,74 ¹ a	8,63 ^{ns} a
25	11,87 a	7,91 b	7,68 b
50	9,51 a	9,09 a	9,03 a
75	10,70 a	8,61 a	10,05 a
100	9,46 a	11,82 a	9,92 a
DMS		2,98	

Médias seguidas de mesma letra na linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Cobre na planta Fonolito = 9,6605 - 0,0767x + 0,0009x² R²=0,83

Para as fontes de K₂O, observou-se que nas doses 0, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O não teve diferença entre as fontes, já para a dose 25 kg ha⁻¹ de K₂O, a maior concentração de Cu foi com a utilização do fonolito (Tabela 9). A média geral das concentrações foliares de Cu foi de 9,60 mg kg⁻¹, valor ligeiramente abaixo da faixa de suficiência estabelecida por Souza e Lobato (2004), de 10 a 30 mg kg⁻¹. Esse resultado evidencia que, mesmo com a adubação potássica, as plantas apresentaram tendência à deficiência marginal de Cu, o que pode limitar processos metabólicos importantes, como a atividade de enzimas oxidases e a lignificação da parede celular (Marschner, 2012). Dessa forma, observa-se que a adubação potássica, em especial com o uso do Fonolito, modulou a absorção de Cu pelas plantas, mas os teores médios

permaneceram ligeiramente abaixo da faixa de suficiência, sugerindo a necessidade de monitoramento mais cuidadoso desse micronutriente no sistema produtivo.

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para a concentração de Zn foliar, não foi observado efeito significativo entre as doses, nas 3 fontes de K_2O . Para as fontes de K_2O , observou-se que nas doses 0, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O não teve diferença entre as fontes, já para a dose 25 kg ha⁻¹ de K_2O , a maior concentração de Zn foi com a utilização do KCl e para a dose de 50 kg ha⁻¹ de K_2O , a maior concentração de Zn foi com a utilização de Fonolito não diferindo do KCl (Tabela 10). De acordo com Souza e Lobato (2004), as médias das concentrações foliares de Zn (39,03 mg kg⁻¹) encontram-se dentro da faixa de suficiência, que seria de 20 a 50 mg kg⁻¹ de K.

Embora as variações entre fontes em algumas doses indiquem certa modulação na absorção de Zn, possivelmente associada a interações iônicas no solo ou no processo de absorção, os resultados mostram que a cultura manteve níveis foliares adequados. Considerando a importância do Zn em processos fisiológicos, como a síntese de auxinas e a atividade enzimática (Marschner, 2012), a manutenção das concentrações dentro da faixa de suficiência reforça que o manejo potássico não comprometeu o estado nutricional desse micronutriente.

Tabela 10. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K_2O) para a concentração de zinco (Zn) foliar para a cultura da soja safra 2021/22

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	Zn foliar (mg kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	41,42 ^{ns} a	38,88 ^{ns} a	38,25 ^{ns} a
25	46,58 a	29,73 b	36,94 b
50	37,26 ab	44,51 a	33,70 b
75	44,75 a	37,92 a	39,37 a
100	38,12 a	42,12 a	35,87 a
DMS		9,23	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Soja safra 2022/23

A interação fontes $\times$ doses de K_2O foi significativa para a altura de plantas, número de grãos por planta e produtividade da soja na safra 2022/23 (Tabelas 11, 12, 13 e 14). As fontes e doses de K_2O não diferiram para a altura de inserção da 1^a vagem e número de vagens por planta (Tabela 11).

O efeito positivo do K sobre a altura de plantas e o número de grãos por planta pode estar associado ao papel essencial do potássio em processos fisiológicos, como a ativação enzimática, o transporte de fotoassimilados e a regulação osmótica, que favorecem o crescimento e o enchimento de grãos (Marschner, 2012). Dessa forma, variações no fornecimento de K, moduladas pelas diferentes fontes, podem ter influenciado diretamente o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da soja.

Em relação à produtividade, a significância da interação demonstra que a eficiência do uso do K₂O depende da fonte e da dose utilizada, refletindo no rendimento final da cultura. Estudos anteriores também reportam que a resposta da soja à adubação potássica pode variar em função da solubilidade e da dinâmica de liberação do K no solo, destacando que fontes alternativas, como rochas potássicas, tendem a apresentar efeitos mais graduais quando comparadas ao KCl (Crusciol et al., 2022; Freire et al., 2023).

Assim, os resultados reforçam a importância do manejo adequado de fontes e doses de K₂O para maximizar o desempenho produtivo da soja, especialmente em atributos diretamente relacionados ao rendimento, como altura de plantas, número de grãos por planta e produtividade.

Tabela 11. Altura de plantas, altura de inserção da 1ª vagem, número de vagens por planta, número de grãos por planta e produtividade da cultura da soja safra 2022/23 fertilizada com fontes e doses de potássio (K₂O)

Tratamentos Fontes de K ₂ O	Altura de plantas (cm)	Altura de inserção da 1ª vagem	Nº de vagens por Planta	Nº de grãos por planta	Produtividade kg ha ⁻¹
KCl	56,2	13,2 a	34,7 a	92,8	2219,40
Fonolito	63,5	13,7 a	33,7 a	87,7	1972,44
Fonolito H.	59,6	13,4 a	36,4 a	93,1	2080,90
DMS	1,7	1,8	4,2	7,5	113,92
Doses de K₂O kg ha⁻¹					
0	54,4	13,5 ^{ns}	32,6 ^{ns}	86,3	1727,07
25	59,0	13,5	39,6	105,5	2117,64
50	60,3	13,4	34,1	90,5	2207,09
75	61,4	13,9	33,6	81,9	2140,11
100	63,8	12,9	34,8	91,7	2262,58
CV (%)	3,75	17,2	15,3	10,3	6,86
Média	59,8	13,5	34,9	91,2	2090,89

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a altura de plantas (Tabela 12), observou-se que para o KCl e para o Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O,

à medida que aumentaram as doses de K_2O , aumentaram a altura de plantas para o KCl, evidenciando a elevada solubilidade e imediata disponibilidade do nutriente nesta fonte, o que favorece o crescimento vegetativo da soja. Esse comportamento está associado ao papel do potássio na expansão celular, no balanço osmótico e na regulação estomática, processos diretamente relacionados ao crescimento em altura. Já para o fonolito H., a maior altura de plantas foi atingida com a dose de $81,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O (Tabela 12), esse resultado sugere que, apesar da menor solubilidade em comparação ao KCl, o tratamento com fonolito H. conferiu maior reatividade, possibilitando liberação gradativa de K, o que favoreceu o crescimento inicial da soja até um ponto ótimo de fornecimento.

Para as fontes de K_2O , observou-se que na dose 100 kg ha^{-1} de K_2O as fontes não diferiram entre si, sugerindo que, em maiores doses, a disponibilidade de K foi suficiente para não limitar o crescimento em altura, independentemente da solubilidade da fonte, para a dose de 0 kg ha^{-1} , a maior altura de plantas foi obtida com Fonolito; para as doses de 25 e 50 kg ha^{-1} de K_2O , a maior altura de plantas foi obtida com o fonolito e fonolito H. e para a dose de 75 kg ha^{-1} de K_2O , a maior altura de plantas foi obtida com o fonolito.

No desdobramento da interação fontes x doses de K_2O para a altura de plantas (Tabela 12), verificou-se efeito significativo das doses tanto para o KCl quanto para o Fonolito H. No caso do KCl, a altura das plantas aumentou progressivamente com o incremento das doses de K_2O , evidenciando a elevada solubilidade e a imediata disponibilidade do nutriente, o que favorece o crescimento vegetativo da soja. Esse comportamento está diretamente associado ao papel do potássio na expansão celular, na manutenção do balanço osmótico e na regulação estomática, processos fundamentais para o crescimento em altura das plantas (Marschner, 2012).

Para o Fonolito H., a maior altura de plantas foi atingida com a dose de $81,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O (Tabela 12). Esse resultado indica que, apesar da menor solubilidade em comparação ao KCl, o Fonolito H. apresentou maior reatividade, liberando potássio de forma gradual e sustentada. Essa liberação controlada permitiu que a soja absorvesse o nutriente de forma contínua ao longo do desenvolvimento inicial, atingindo um ponto ótimo de fornecimento que favoreceu o crescimento em altura.

Esses resultados reforçam a importância do tipo de fonte de K na determinação da disponibilidade do nutriente ao longo do ciclo da soja. Enquanto o KCl oferece efeito imediato devido à sua alta solubilidade, fontes como o Fonolito H. proporcionam liberação gradual, o que pode ser vantajoso em sistemas de manejo onde se busca suprimento contínuo de K, evitando

flutuações nutricionais. Dessa forma, a escolha da fonte e da dose adequada de K_2O é determinante para otimizar o crescimento vegetativo da cultura.

Tabela 12. Desdobramento da interação fontes com doses de potássio (K_2O) para a altura de plantas da soja safra 2022/23

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	Altura de plantas (cm)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	48,2 ¹ c	62,0 ^{ns} a	52,8 ² b
25	52,0 b	63,4 a	60,6 a
50	55,4 b	64,4 a	61,1 a
75	59,4 b	64,4 a	60,5 b
100	65,2 a	63,1 a	63,1 a
DMS		3,9	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Altura de Plantas KCl = $48,1100 + 0,1619x$ $R^2=0,98$

² Altura de Plantas Fonolito H. = $53,9000 + 0,2121x - 0,0013x^2$ $R^2=0,82$

Para o desdobramento da interação fontes com doses de potássio (K_2O) para o número de grãos por planta (Tabela 13), apenas o Fonolito apresentou efeito significativo para as doses de K_2O , à medida que aumentaram as doses de K_2O , diminuiu o número de grãos por plantas. Para as fontes de K_2O , observou-se que para a fonte KCl nas doses 25, 50 kg ha⁻¹ não diferiram entre si, mas para a dose 0 kg ha⁻¹ as fontes fonolito e fonolito H. obteve o número de grãos por plantas maiores que o KCl. Para a dose de 75 kg ha⁻¹, o maior número de grãos foi obtido com o KCl quando comparado ao Fonolito H. e não diferenciando do Fonolito. Já para a dose de 100 kg ha⁻¹ o maior número de grãos por planta foi com a utilização de KCl e Fonolito H.

A redução do número de grãos por planta em doses elevadas de Fonolito pode estar relacionada à liberação gradual de K, que nem sempre atende à demanda da planta nos períodos críticos de frutificação. Por outro lado, o KCl, devido à rápida disponibilidade, promoveu maior número de grãos e produtividade em doses altas, corroborando estudos que relatam resposta positiva da soja à adubação potássica imediata (Crusciol et al., 2022).

Dessa forma, os resultados demonstram que a escolha da fonte e da dose de K_2O é determinante para otimizar tanto o crescimento vegetativo quanto a produtividade da soja. Fontes solúveis atendem à demanda imediata da planta, enquanto fontes de liberação gradual podem ser indicadas para fornecer K ao longo do ciclo. O manejo adequado do potássio, aliado ao monitoramento dos nutrientes foliares, é essencial para garantir o equilíbrio nutricional, maximizar a produção e prevenir possíveis deficiências ou antagonismos entre os elementos.

Tabela 13. Desdobramento da interação fontes com doses de potássio (K₂O) para o número de grãos por planta de soja safra 2022/23

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Nº de grãos por planta		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	70,9 ^{ns} b	93,4 ¹ a	94,7 ^{ns} a
25	113,4 a	99,1 a	104,1 a
50	85,6 a	88,3 a	97,6 a
75	90,4 a	83,5 ab	71,7 b
100	103,6 a	74,0 b	97,3 a
DMS		16,7	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Nº de grãos por planta Fonolito = 98,5000 – 0,2169x R²=0,80

No desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a produtividade da soja (Tabela 14), verificou-se que apenas o KCl e o Fonolito H. apresentaram efeito significativo das doses. A maior produtividade foi obtida com o KCl na dose de 75,3 kg ha⁻¹ de K₂O, enquanto para o Fonolito H. a produtividade máxima ocorreu com 71 kg ha⁻¹ de K₂O. Esses resultados indicam que ambas as fontes são capazes de atender à demanda de potássio da cultura, embora com dinâmica de liberação distinta: o KCl fornece K de forma imediata, enquanto o Fonolito H. apresenta liberação gradual e sustentada, promovendo efeito produtivo semelhante em doses adequadas.

Ao analisar as doses de 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O, observou-se que as produtividades obtidas com KCl e Fonolito H. foram, em geral, semelhantes e inferiores às obtidas com o Fonolito, com exceção das doses de 75 e 100 kg ha⁻¹, nas quais o Fonolito H. não diferiu do Fonolito. Esses resultados sugerem que o Fonolito H. apresenta potencial para substituir o KCl em sistemas de produção de soja, funcionando como remineralizador do solo, fornecendo K de forma gradual e sustentável.

Dessa forma, o Fonolito H. se mostra promissor como alternativa às fontes solúveis de potássio, podendo contribuir para estratégias de manejo que buscam eficiência nutricional e sustentabilidade em médio e longo prazo. A adoção de fontes de liberação gradual pode reduzir perdas por lixiviação, diminuir a necessidade de aplicações frequentes e favorecer o equilíbrio nutricional da soja ao longo do ciclo produtivo, sem comprometer a produtividade final.

Tabela 14. Desdobramento da interação fontes com doses de potássio (K₂O) para a produtividade de soja safra 2022/23

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Produtividade (kg ha ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	1663,4 ¹ ab	1888,9 ^{ns} a	1628,9 ² b
25	2199,6 a	2189,4 a	1963,9 a
50	2452,6 a	1771,0 b	2397,7 a
75	2323,7 a	1924,9 b	2171,7 ab
100	2457,5 a	2088,0 b	2242,2 ab
DMS		254,7	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Produtividade KCl = $1707,3724 + 20,4098x - 0,1356x^2$ $R^2=0,92$

² Produtividade Fonolito H. = $1624,1901 + 19,3246x - 0,1359x^2$ $R^2=0,87$

A interação fontes x doses de K₂O foi significativa para as concentrações foliares de P e K (Tabela 15). Em relação ao N, observou-se que as maiores concentrações foram obtidas com a utilização do Fonolito e do Fonolito H., indicando que essas fontes remineralizadoras podem favorecer a absorção ou a manutenção do N na planta, possivelmente por disponibilizarem nutrientes de forma mais equilibrada ao longo do ciclo. Para o cálcio, os maiores teores foram registrados com a aplicação de KCl e Fonolito H., evidenciando que a fonte de K também interfere na dinâmica desse nutriente. Já as doses de K₂O influenciaram significativamente as concentrações de Ca e Mg, com médias de 8,95 e 2,53 g kg⁻¹, respectivamente, apresentando tendência de redução à medida que se aumentaram as doses de K₂O. Esse comportamento pode ser explicado pelo antagonismo iônico entre o K⁺ e os cátions bivalentes Ca²⁺ e Mg²⁺, em que o excesso de potássio na solução do solo reduz a absorção relativa de Ca e Mg pelas raízes, conforme já descrito por (Marschner, 2012).

Resultados semelhantes foram relatados por Rosolem et al. (2012), que observaram redução nos teores foliares de Ca e Mg em soja cultivada sob doses elevadas de K. Além disso, estudos recentes reforçam que remineralizadores, como o fonolito, podem apresentar eficiência comparável ao KCl, fornecendo K de forma gradual e sustentada (Crusciol et al., 2022; Santos et al., 2021), o que contribui para menor competição com Ca e Mg e favorece maior equilíbrio nutricional da soja em médio e longo prazo.

Tabela 15. Concentração de macronutrientes na cultura da soja safra 2022/23 fertilizada com fontes e doses de potássio (K₂O)

Tratamentos	N	P	K g kg ⁻¹	Ca	Mg
Fontes de K ₂ O					
KCl	14,84b	3,58	13,22	9,47a	2,37 a
Fonolito	17,50a	3,24	10,25	8,37b	2,59 a
Fonolito H.	17,22a	3,55	12,25	9,00a	2,63 a
DMS	2,14	0,30	1,51	0,58	0,41
Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹					
0	17,27 ^{ns}	3,42	9,39	9,56 ¹	2,91 ²
25	14,82	3,70	11,70	9,31	2,71
50	16,33	3,53	11,78	8,97	2,47
75	17,03	3,23	12,20	8,42	2,26
100	17,15	3,40	14,47	8,48	2,30
CV (%)	16,84	11,45	16,47	8,46	14,54
Média	16,52	3,46	11,91	8,95	2,53

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{Ca na planta} = 9,5543 - 0,0122x \quad R^2=0,92$$

$$^2 \text{Mg na planta} = 2,8603 - 0,0066x \quad R^2=0,9$$

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a concentração de P foliar, foi observado efeito significativo entre as doses apenas para o KCL, no entanto, para as fontes de K₂O, observou-se somente na dose 0 e 75 kg ha⁻¹ de K₂O diferença, sendo que o KCl apresentou a maior concentração de P, não diferindo do Fonolito H. (Tabela 16). De acordo com Souza e Lobato (2004), as médias das concentrações foliares de P encontram-se dentro da faixa de suficiência, que seria de 2,5 a 5,0 g kg⁻¹ de P.

Tabela 16. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a concentração de fósforo (P) foliar para a cultura da soja safra 2022/23

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	P foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	4,03 ¹ a	2,81 ^{ns} b	3,42 ^{ns} ab
25	4,36 a	3,99 a	3,65 a
50	3,34 a	3,63 a	3,61 a
75	3,57 a	2,65 b	3,48 a
100	3,51 a	3,11 a	3,59 a
DMS		0,68	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 P \text{ na planta KCl} = 3,9606 - 0,0192x + 0,0002x^2 \quad R^2=0,7$$

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a concentração de K foliar, foi observado efeito significativo entre as doses, apenas para o KCl, no entanto, para as fontes de K₂O, observou-se somente nas doses 0, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O diferenças significativas, sendo que o fonolito H. não diferiu do KCl (Tabela 17). O trabalho de Montes (2022), onde comparou-se fontes de K₂O na cultura da cana-de-açúcar a adubação potássica, independente da fonte utilizada, foi capaz de proporcionar o aumento dos teores de Si e K na planta.

Duarte et al. (2013), avaliando o efeito da aplicação de doses (50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de K₂O) e fontes de potássio (fonolito de Poços de Caldas-MG e KCl), aplicadas no sulco de plantio da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho acriférico, com baixo teor de potássio (0,08 cmolc dm⁻³), verificaram que o fonolito não diferiu do controle e nem dos tratamentos com o KCl em relação às variáveis analisadas: altura de plantas, TCH e a qualidade da cana planta (Brix, Pol e ATR). Os autores indicam que apesar de não haver diferença estatística, foi percebido que, na média das doses, o KCl foi 4,6% superior ao fonolito na produção de colmos, indicando que o desempenho agrônomo do fonolito foi prejudicado pela forma de aplicação.

Tabela 17. Desdobramento da interação fontes de potássio com doses de potássio (K₂O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura da soja safra 2022/23

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	K foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	9,55 ¹ a	9,56 ^{ns} a	9,05 ^{ns} ab
25	11,78 a	10,67 a	12,65 a
50	11,78 ab	9,30 b	14,26 a
75	13,52 a	10,05 b	13,02 ab
100	19,47 a	11,66 b	12,28 b
DMS		3,37	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{ K na planta KCl} = 8,9070 + 0,0863x \quad R^2=0,82$$

$$^2 \text{ K na planta Fonolito H.} = 9,2427 + 0,1590x - 0,0013x^2 \quad R^2=0,94$$

A interação fontes x doses de K₂O foi significativa apenas para a concentração de Cu (Tabela 18). Para os demais micronutrientes avaliados (Mn, Fe e Zn), as maiores concentrações foliares foram observadas com a utilização do KCl, diferindo significativamente do Fonolito e Fonolito H. No entanto, as doses de K₂O, de forma isolada, não promoveram diferenças significativas nas concentrações desses micronutrientes.

Esse resultado sugere que a fonte de potássio exerce maior influência sobre a disponibilidade e absorção de micronutrientes do que o aumento progressivo das doses aplicadas, corroborando Marschner (2012), que destaca a ocorrência de interações iônicas no processo de absorção de nutrientes pelas plantas. Estudos de Mascarenhas et al. (1988) e Rosolem et al. (2012) também relataram que fontes de K mais solúveis, como o KCl, podem favorecer maior absorção de micronutrientes como Fe e Zn, enquanto fontes de liberação gradual apresentam efeito mais moderado.

De forma semelhante, Santos et al. (2021) observaram que remineralizadores, a exemplo do fonolito, apresentam eficiência agrônômica comparável ao KCl em termos de fornecimento de potássio, mas com menor impacto imediato sobre a absorção de micronutrientes, o que pode explicar os menores teores observados neste estudo.

Tabela 18. Concentração de micronutrientes na cultura da soja safra 2022/23 fertilizada com fontes e doses de potássio (K₂O)

Tratamentos	Cu	Mn	Fe	Zn
Fontes de K₂O			mg kg ⁻¹	
KCl	7,97	155,43 a	402,91 a	44,44 a
Fonolito	6,01	133,75 b	271,39 b	34,14 b
Fonolito H.	6,18	140,68 ab	232,48 b	36,98 b
DMS	2,10	8,53	58,32	5,08
Doses de K₂O kg ha⁻¹				
0	7,27 ^{ns}	132,42 ^{ns}	307,53 ^{ns}	37,41 ^{ns}
25	7,41	162,32	376,97	43,00
50	5,34	132,70	253,78	34,59
75	6,47	144,66	300,48	38,93
100	7,11	144,34	272,52	38,67
CV (%)	40,64	16,60	25,11	17,17
Média	6,72	143,29	302,26	38,52

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Safra MILHO 2022

A interação fontes x doses de K₂O foi significativa para a altura de plantas, tamanho de espigas, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e produtividade (Tabelas 19 a 24). As fontes de K₂O influenciaram apenas o valor SPAD, o efeito residual do milho fertilizado com Fonolito H. foi o de maior valor SPAD (63,51), já para as doses de K₂O isoladas não interferiram em nenhuma variável. O efeito residual das doses e fontes de K₂O não foram significativos para o número de fileiras por espiga, sendo a média de 15,25 fileiras por espiga (Tabela 19).

A interação fontes x doses de K₂O foi significativa para a altura de plantas, tamanho de espigas, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e produtividade do milho (Tabelas 19 a 24). Entre as variáveis isoladas, as fontes de K₂O influenciaram apenas os valores de SPAD, sendo que o efeito residual do milho fertilizado com Fonolito H. apresentou o maior valor (63,51), evidenciando possível melhoria no status de nitrogênio e na eficiência fotossintética da cultura. Por outro lado, as doses de K₂O aplicadas isoladamente não interferiram de forma significativa em nenhuma das variáveis analisadas. Para o número de fileiras por espiga, o efeito residual das fontes e doses de K₂O não foi significativo, com média de 15,25 fileiras por espiga (Tabela 19), indicando que essa característica apresenta baixa sensibilidade à adubação potássica, sendo mais dependente do genótipo e de condições ambientais (Marschner, 2012).

Resultados semelhantes foram relatados por Crusciol et al., 2022 e Santos et al. (2021), que verificaram respostas diferenciadas de variáveis produtivas do milho em função da fonte de potássio utilizada, com destaque para os remineralizadores, como o fonolito, que apresentaram potencial de substituir parcialmente o KCl, liberando o nutriente de forma gradual e contribuindo para efeitos residuais positivos na cultura subsequente.

Tabela 19. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K₂O) para o valor SPAD, altura de plantas, tamanho de espigas, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e produtividade da cultura do milho safra 2022

Tratamentos	Valor SPAD	Altura de plantas (m)	Tamanho de Espiga (m)	Nº de fileiras por Espiga	Número de Grãos por Fileira	Número de Grãos por Espiga	Produtividade kg ha ⁻¹
Fontes de K₂O							
KCl	59,11b	1,61	0,59	15,16 a	27,20	414,15	1764,25
Fonolito	60,81b	1,68	0,67	15,16 a	28,85	446,66	1742,61
Fonolito H.	63,51a	1,53	0,55	15,49 a	27,80	423,90	1500,79
DMS	2,48	0,07	5,2	0,47	1,22	21,68	370,52
Doses de K₂O kg ha⁻¹							
0	61,73 ^{ns}	1,53	0,55	15,33 ^{ns}	27,15	417,52	1672,52
25	60,18	1,52	0,57	14,94	26,84	405,59	1791,35
50	61,15	1,62	0,61	15,35	28,23	433,98	1526,92
75	59,54	1,67	0,62	15,18	28,53	434,20	1743,62
100	63,09	1,68	0,67	15,45	29,10	449,88	1611,68
CV (%)	5,27	5,41	9,12	3,97	5,66	6,59	28,88
Média	61,14	1,61	0,60	15,25	27,97	428,24	1669,22

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a altura de plantas, observou-se que tanto para o KCl quanto para o Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O, de modo que o incremento das doses promoveu aumento na altura das plantas. Considerando a comparação entre fontes, verificou-se que, nas doses de 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O, não houve diferença entre elas; entretanto, nas doses de 0 e 25 kg ha⁻¹, a maior altura de plantas foi obtida com a aplicação de Fonolito. A média geral de altura foi de 1,61 m, valor inferior ao esperado para o híbrido B2612PWU, cuja altura média reportada pelo obtentor é de aproximadamente 2,70 m.

Essa diferença pode estar associada a condições edafoclimáticas do experimento, ao efeito residual do potássio aplicado na safra anterior (soja) ou ainda a limitações no fornecimento de outros nutrientes essenciais, influenciando negativamente o desenvolvimento

vegetativo do milho. Resultados semelhantes foram descritos por Rosolem et al. (2012) e Crusciol et al., 2022, que destacam a influência da disponibilidade de potássio no crescimento em altura, mas também ressaltam a forte dependência desse parâmetro de fatores ambientais e genotípicos.

Tabela 20. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a altura de plantas do milho safra 2022

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	Altura de plantas (m)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	1,46 ¹ b	1,68 ^{ns} a	1,45 ² b
25	1,51 b	1,76 a	1,31 c
50	1,66 a	1,63 a	1,59 a
75	1,70 a	1,65 a	1,60 a
100	1,76 a	1,68 a	1,68 a
DMS		0,15	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Altura de Plantas KCl = $1,4550 + 0,0032x$ $R^2=0,97$

² Altura de Plantas Fonolito H. = $1,3875 + 0,0028x$ $R^2=0,56$

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para o tamanho de espigas, observou-se que, especificamente para o KCl, houve efeito significativo das doses de K_2O . À medida que aumentaram as doses aplicadas, verificou-se incremento no comprimento de espigas. Esse resultado pode ser explicado pela alta solubilidade do KCl, que proporciona maior disponibilidade imediata de potássio no solo, favorecendo processos fisiológicos ligados ao desenvolvimento reprodutivo. O potássio desempenha papel essencial no transporte e redistribuição de fotoassimilados, na regulação osmótica e no enchimento de grãos, fatores determinantes para o crescimento e uniformidade das espigas (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). Dessa forma, a utilização de uma fonte prontamente disponível, como o KCl, potencializou o efeito positivo das doses de K_2O , resultando em espigas maiores em comparação às demais fontes. Resultados semelhantes foram relatados por Sangoi et al. (2019) e Nogueira et al. (2021), que também verificaram aumento do tamanho de espigas de milho com a elevação das doses de K em sistemas de cultivo com adubação potássica de alta solubilidade.

Para as fontes de K_2O , verificou-se que, na dose de 50 kg ha⁻¹ de K_2O , não houve diferença significativa entre as fontes. Já na testemunha (0 kg ha⁻¹ de K_2O), a utilização de Fonolito resultou em maior tamanho de espiga em relação ao KCl, não diferindo, contudo, do Fonolito H. Na

dose de 25 kg ha⁻¹ de K₂O, o maior comprimento de espiga foi obtido com o Fonolito, seguido pelo KCl e pelo Fonolito H. Para a dose de 75 kg ha⁻¹ de K₂O, a maior espiga foi registrada com o Fonolito, sem diferença estatística em relação ao KCl. Por fim, na dose de 100 kg ha⁻¹ de K₂O, o maior tamanho de espiga foi observado com a utilização de KCl, não diferindo significativamente do Fonolito.

Esses resultados indicam que, embora o KCl apresente maior solubilidade e efeito imediato, fontes alternativas como o Fonolito e o Fonolito H. podem apresentar desempenho semelhante em determinadas doses, sugerindo potencial para uso como remineralizadores em substituição parcial ao KCl em sistemas de produção sustentáveis. Estudos como os de Santos et al. (2018) também observaram que o uso de pó de rocha (fonolito) pode proporcionar efeitos positivos no desenvolvimento e produtividade do milho, com desempenho semelhante ao KCl em médio prazo, principalmente pelo fornecimento gradual de potássio. Além disso, Viana et al. (2025) destacam que remineralizadores como o fonolito contribuem não apenas para o suprimento de K, mas também para a melhoria da fertilidade do solo ao longo do tempo, reforçando seu potencial em sistemas agrícolas sustentáveis.

Tabela 21. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para tamanho da espiga do milho safra 2022

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Tamanho da Espiga (m)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	0,51 ¹ b	0,61 ^{ns} a	0,53 ^{ns} ab
25	0,53 b	0,75 a	0,43 c
50	0,59 a	0,65 a	0,58 a
75	0,62 ab	0,68 a	0,58 b
100	0,72 a	0,66 ab	0,62 b
DMS		0,09	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Tamanho de Espiga KCl = 0,4955 + 0,0020x

R²=0,93

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para o número de grãos por fileira, observou-se que para o KCl e Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K₂O, à medida que aumentaram as doses de K₂O, aumentaram o número de grãos por fileira para o KCl e Fonolito H. Esse resultado confirma o papel do potássio como nutriente importante na translocação de carboidratos, enchimento de grãos e na manutenção do potencial osmótico durante a fase

reprodutiva da cultura, favorecendo a formação de grãos viáveis por espiga (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017).

Além disso, a maior eficiência do KCl pode ser atribuída à sua elevada solubilidade, garantindo imediata disponibilidade do nutriente, enquanto o desempenho observado para o Fonolito H. reforça seu potencial como fonte alternativa, capaz de liberar potássio de forma gradativa. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos et al. (2020) e Nogueira et al. (2021), que verificaram incrementos no número de grãos por espiga e na produtividade do milho com a aplicação de diferentes fontes de K, destacando o papel do fonolito como remineralizador viável em sistemas agrícolas sustentáveis.

Para as fontes de K_2O , verificou-se que, nas doses de 0, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹ de K_2O , não houve diferença significativa entre as fontes. No entanto, na dose de 25 kg ha⁻¹ de K_2O , a utilização do Fonolito resultou em maior número de grãos por fileira em comparação ao KCl e ao Fonolito H. (Tabela 22).

Esse resultado indica que, em doses intermediárias, fontes alternativas como o Fonolito podem favorecer melhor a formação de grãos, possivelmente devido à liberação gradual de potássio, que atende de forma equilibrada à demanda da planta durante a fase de enchimento de grãos. Estudos de Nogueira et al. (2021) e Santos et al. (2020) também destacam que remineralizadores, como o Fonolito, podem apresentar desempenho comparável ao KCl em determinados níveis de aplicação, contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis.

Tabela 22. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para o número de grãos por fileira do milho safra 2022

Doses de K_2O kg ha ⁻¹	Número de Grãos por Fileira		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	26,68 ¹ a	28,13 ^{ns} a	26,65 ² a
25	25,68 b	30,43 a	24,43 b
50	27,70 a	29,00 a	28,00 a
75	28,20 a	27,58 a	29,83 a
100	28,10 a	29,10 a	30,10 a
DMS		2,72	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Número de grãos por Fileira KCl = 26,1950 + 0,0215x R²=0,62

² Número de grãos por Fileira Fonolito H. = 25,3400 + 0,492x R²=0,68

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para o número de grãos por espiga, observou-se que para o KCl e Fonolito H. houve efeito significativo das doses de K_2O , sendo que o mínimo número de grãos por espiga foi obtido com a dose de 25 kg ha^{-1} , para o KCl e Fonolito H. Para as fontes de K_2O , observou-se que na dose 0, 50, 75 e 100 kg ha^{-1} de K_2O as fontes não diferiram entre si, apenas para a dose 25 kg ha^{-1} de K_2O , com a utilização de Fonolito o número de grãos por espiga foi maior do que o KCl e Fonolito H. (Tabela 23).

Esse comportamento reforça o papel do potássio na translocação de fotoassimilados, enchimento de grãos e manutenção do potencial osmótico durante a fase reprodutiva, fatores que favorecem a formação de grãos viáveis (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). Além disso, a eficiência do Fonolito em doses específicas evidencia que fontes alternativas de K, com liberação gradual, podem fornecer o nutriente de forma contínua ao longo do ciclo da planta, promovendo produtividade semelhante ao KCl. Resultados semelhantes foram observados por Silveria et al. (2018), que demonstraram a solubilização gradual de K do fonolito por microrganismos do solo, e Santos et al. (2020), que relataram desempenho comparável ao KCl em milho cultivado com fonolito, especialmente em combinação com resíduos orgânicos, reforçando o potencial dessas fontes alternativas para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Tabela 23. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para o número de grãos por espiga do milho safra 2022

Doses de K_2O kg ha^{-1}	Número de Grãos por Espiga		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	415,95 ¹ a	428,85 ^{ns} a	407,75 ² a
25	387,98 b	471,50 a	357,30 b
50	412,90 a	458,30 a	430,75 a
75	422,15 a	431,60 a	448,85 a
100	431,75 a	443,05 a	474,85 a
DMS		48,48	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Número de grãos por Espiga KCl = $409,4864 - 0,4166x + 0,0068x^2$ $R^2=0,64$

¹ Número de grãos por Espiga Fonolito H. = $392,6857 - 0,2119x + 0,0111x^2$ $R^2=0,73$

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para a produtividade do milho, observou-se efeito significativo das doses apenas para o Fonolito e o Fonolito H., sendo que o menor valor de produtividade de grãos foi obtido com a aplicação de 25 kg ha^{-1} de K_2O , respectivamente para o Fonolito e o Fonolito H. Considerando as fontes de K_2O , não houve diferença significativa

nas doses de 0, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹; entretanto, na dose de 25 kg ha⁻¹, a utilização de KCl e Fonolito resultou em maior produtividade em comparação ao Fonolito H. (Tabela 24).

A ausência de diferenças significativas na produtividade para a maioria das doses entre as fontes indica que o KCl pode ser substituído por remineralizadores de solo, como o Fonolito e o Fonolito H., sem prejuízo para a produção. Esse comportamento é explicado pelo fornecimento gradual de K por fontes de liberação lenta, que atende à demanda da planta durante o ciclo, favorecendo o crescimento vegetativo e reprodutivo (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). Resultados semelhantes foram observados por Silveria et al. (2018), que demonstraram a liberação gradual de potássio do Fonolito por microrganismos do solo, e por Santos et al. (2020), que relataram produtividade equivalente ao KCl quando o Fonolito foi utilizado, principalmente quando combinado com resíduos orgânicos, reforçando o potencial de fontes alternativas para sistemas agrícolas sustentáveis.

Tabela 24. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para a produtividade de grãos do milho safra 2022

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Produtividade (kg ha ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	1646,00 ^{ns} a	2213,75 ¹ a	1447,51 ² a
25	1959,18 a	2565,99 a	848,89 b
50	1515,75 a	1387,15 a	1677,86 a
75	1897,73 a	1613,38 a	1719,74 a
100	1802,58 a	1222,51 a	1809,95 a
DMS		828,51	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Produtividade Fonolito = 2119,38 – 1,8733x – 0,0755x² R²=0,52

² Produtividade Fonolito H. = 1266,0127 – 0,3664x + 0,0675x² R²=0,46

A interação fontes × doses de K₂O foi significativa para as concentrações foliares de K e Mg (Tabela 25). Em contrapartida, as fontes e doses de K₂O não influenciaram as concentrações de P e Ca, cujas médias foram de 4,03 e 5,51 g kg⁻¹, respectivamente. Esses valores indicam que, para P e Ca, não houve efeito direto do manejo de fontes e doses de K, possivelmente em função da disponibilidade adequada desses nutrientes no solo, que pode ter mascarado diferenças entre tratamentos.

O comportamento distinto de K e Mg pode ser explicado pelo antagonismo iônico entre esses cátions, uma vez que o aumento na disponibilidade de K tende a reduzir a absorção de

Mg pelas plantas devido à competição pelos mesmos sítios de transporte radicular (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). Resultados semelhantes foram observados por Crusciol et al., (2022), que relataram redução no acúmulo de Mg em folhas de soja com a elevação das doses de K. Nesse contexto, a variação significativa de K e Mg em função das fontes e doses reforça a importância de equilibrar o fornecimento de potássio para evitar desbalanços nutricionais que possam comprometer a eficiência metabólica da cultura.

Tabela 25. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para a concentração de macronutrientes na cultura do milho safra 2022

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg
	g kg ⁻¹				
Fontes de K ₂ O					
KCl		3,99a	1,57	5,80 ^a	4,64
Fonolito		3,97a	1,52	5,74 ^a	3,84
Fonolito H.		4,12a	1,43	4,98 ^a	3,55
DMS		0,51	0,16	1,21	
Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹					
0		4,10 ^{ns}	1,38	5,66 ^{ns}	4,82
25		3,84	1,33	6,26	3,88
50		4,32	1,66	5,08	4,26
75		4,02	1,59	5,13	3,53
100		3,87	1,56	5,40	3,58
CV (%)		16,36	14,03	28,60	18,12
Média		4,03	1,51	5,51	4,01

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o desdobramento da interação fontes $\times$ doses de K_2O para a concentração foliar de K, observou-se que para o KCl e o Fonolito H houve efeito significativo das doses de K_2O . No caso do KCl, à medida que se elevaram as doses de K_2O , verificou-se incremento nas concentrações foliares de K. Já para o Fonolito H, o ponto de máxima concentração foi obtido com a dose de 76,25 kg ha⁻¹ de K_2O (Tabela 26).

Em relação às fontes de K_2O , constatou-se que nas doses de 0, 25 e 75 kg ha⁻¹ não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Entretanto, na dose de 50 kg ha⁻¹, a maior concentração foliar de K foi registrada com o uso do Fonolito, não diferindo do KCl. Já na dose de 100 kg ha⁻¹, a maior concentração foi obtida com o KCl, que não diferiu estatisticamente do Fonolito H. Esses resultados evidenciam que tanto o fertilizante solúvel (KCl) quanto as fontes

remineralizadoras (Fonolito e Fonolito H) são capazes de disponibilizar potássio às plantas, embora com dinâmicas distintas de liberação, o que reflete diretamente na absorção e acúmulo foliar.

Esse comportamento reforça a relevância do K na nutrição da cultura, visto que sua absorção responde diretamente à disponibilidade no solo e às características de liberação das fontes, sendo essencial para a manutenção da turgescência celular, ativação enzimática e regulação osmótica (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017). Resultados semelhantes foram reportados Soratto (2021), que verificaram incremento nos teores foliares de K com a aplicação de diferentes fontes de potássio em milho, destacando que fontes remineralizadoras apresentaram efeito positivo na absorção, ainda que em ritmo mais gradual quando comparadas ao KCl. Da mesma forma, Crusciol et al., 2022 observaram que a aplicação de pó de rocha elevou significativamente os teores de K foliar em milho e soja, indicando potencial de substituição parcial do KCl em sistemas de manejo sustentável.

Tabela 26. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura do milho 2022

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	K foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	1,31 ¹ a	1,55 ^{ns} a	1,28 ² a
25	1,39 a	1,28 a	1,33 a
50	1,65 ab	1,86 a	1,47 b
75	1,66 a	1,54 a	1,58 a
100	1,85 a	1,35 b	1,49 ab
DMS		0,36	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ K na planta KCl = 1,3000 + 0,0054x R²=0,95

² K na planta Fonolito H. = 1,2503 + 0,0061x - 0,00004x² R²=0,87

Para o desdobramento da interação fontes × doses de K₂O para a concentração foliar de Mg, observou-se que para o KCl e o Fonolito houve efeito significativo das doses de K₂O. Para o KCl, verificou-se um ponto de mínimo na dose de 105,5 kg ha⁻¹ de K₂O, enquanto para o Fonolito o ponto de máximo ocorreu na dose de 36,75 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 27). Esse comportamento está diretamente associado ao antagonismo entre os íons K⁺ e Mg²⁺, amplamente descrito na literatura.

O aumento das doses de K_2O , principalmente quando fornecido por uma fonte altamente solúvel como o KCl, promove maior competição entre K^+ e Mg^{2+} no processo de absorção radicular, resultando em redução dos teores de Mg nas folhas. Esse efeito de antagonismo já havia sido descrito por Marschner (1995) e reiterado por Marschner (2012), destacando que doses elevadas de K podem induzir a deficiência de Mg em solos com baixa disponibilidade do nutriente.

Resultados semelhantes foram relatados por Nogueira et al. (2021), que observaram decréscimo da concentração de Mg foliar em milho à medida que se aumentaram as doses de KCl, reforçando o papel do desequilíbrio catiônico no solo. Do mesmo modo, (Santos et al., 2012) verificaram antagonismo K–Mg em citros, evidenciando que a aplicação excessiva de KCl reduziu a absorção de Mg. Esses achados confirmam que a escolha da fonte de potássio e o ajuste adequado das doses são fundamentais para evitar a deficiência induzida de Mg e garantir o equilíbrio nutricional da cultura.

Para as fontes de K_2O , observou-se que nas doses de 75 e 100 kg ha⁻¹ não houve diferença significativa entre as fontes. Já na testemunha (0 kg ha⁻¹ de K_2O), a maior concentração de Mg foi obtida com a utilização de KCl. Para as doses de 25 e 50 kg ha⁻¹ de K_2O , a maior concentração de Mg foi verificada também com o uso do KCl, não diferindo estatisticamente do Fonolito (Tabela 27). Esse resultado sugere que, em condições de menor disponibilidade de K, o KCl pode favorecer a absorção de Mg, provavelmente em função da maior solubilidade e imediata disponibilidade de K^+ no solo, promovendo interações diferenciadas na absorção radicular. No entanto, com o aumento das doses de K_2O , o efeito competitivo entre os cátions K^+ e Mg^{2+} prevalece, reduzindo a concentração foliar de Mg, como discutido anteriormente no contexto do antagonismo iônico (Marschner, 2012).

Tabela 27. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para a concentração de magnésio (Mg) foliar para a cultura do milho safra 2022

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	Mg foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	6,93 ¹ a	3,99 ² b	3,53 ^{ns} b
25	4,87 a	3,85 ab	2,92 b
50	4,90 a	4,26 ab	3,63 b
75	3,27 a	3,88 a	3,42 a
100	3,24 a	3,23 a	4,28 a
DMS			

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Magnésio na planta KCl = $6,7778 - 0,0633x + 0,0003x^2$ $R^2=0,92$

² Magnésio na planta Fonolito = $3,8830 + 0,0147x - 0,0002x^2$ $R^2=0,79$

A interação fontes $\times$ doses de K₂O não foi significativa para a concentração de Cu, Mn, Fe e Zn (Tabela 28). As fontes de K₂O não influenciaram as concentrações de Cu, Fe e Zn, já para a concentração de Mn a maior foi quando utilizado o Fonolito. As doses K₂O influenciaram a concentração de Mn com ponto de mínima concentração com a dose de 61,15 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 28). De acordo com Souza e Lobato (2004), as concentrações de Mn e Fe foliar encontram-se dentro da faixa de suficiência, sendo resultado agrônômico positivo. Independentemente da fonte ou dose de K₂O utilizadas (dentro da faixa testada), a planta conseguiu manter sua nutrição de Mn e Fe em concentrações adequadas para o seu desenvolvimento, não comprometeram o estado nutricional da planta em relação a esses micronutrientes.

Tabela 28. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K₂O) para concentração de micronutrientes na cultura do milho safra 2022

Tratamentos	Cu	Mn	Fe	Zn
Fontes de K₂O	mg kg⁻¹			
KCl	11,65a	66,53b	238,22 ^a	11,40 ^a
Fonolito	10,86a	81,46a	257,34 ^a	11,32 ^a
Fonolito H.	11,52a	63,09b	189,49 ^a	11,16 ^a
DMS	0,90	6,82	68,04	16,23
Doses de K₂O				
kg ha⁻¹				
0	10,75 ^{ns}	78,97 ¹	220,24 ^{ns}	10,72 ^{ns}
25	10,95	71,33	249,67	14,62
50	11,81	64,31	219,10	14,87
75	11,73	66,78	219,31	11,61
100	11,49	70,40	233,44	11,30
CV (%)	10,34	12,62	38,77	44,40
Média	11,34	70,36	228,35	12,62

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{Mn na planta} = 79,2689 - 0,4525x + 0,0037x^2 \quad R^2=0,97$$

Safra Milho 2023

A interação fontes x doses de K₂O não foi significativa para os atributos avaliados (Tabela 29). As fontes de K₂O influenciaram apenas o valor SPAD, sendo que o efeito residual do milho fertilizado com Fonolito H. resultou no maior valor (63,20). A ausência de diferenças expressivas entre as fontes de K₂O para a maioria das variáveis, incluindo a produtividade, sugere que, do ponto de vista do desenvolvimento da estrutura da planta e da espiga, os fertilizantes testados apresentaram efeito semelhante. Isso abre margem para que o agricultor escolha a fonte de K₂O com base em critérios econômicos e de disponibilidade regional, sem comprometer significativamente a performance da cultura.

No que se refere às doses de K₂O isoladas, observou-se efeito significativo sobre as variáveis valor SPAD, altura de plantas, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira e número de grãos por espiga. Os pontos de mínimo valor foram estimados em 43,4; 30,0; 59,0; 29,5 e 43,5 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. Esse comportamento em curva pode estar relacionado ao equilíbrio nutricional e ao fenômeno de antagonismo, no qual o excesso de K no solo pode limitar a absorção de outros nutrientes essenciais, reduzindo temporariamente o desempenho da planta antes que o aumento das doses retome um efeito positivo.

A média da altura de plantas foi de 1,87 m, valor inferior ao esperado para o híbrido B2620PWU (2,35 m). Essa diferença pode estar associada a fatores edafoclimáticos específicos do experimento, como disponibilidade hídrica, temperatura ou mesmo interações nutricionais no solo, que limitaram o pleno crescimento vegetativo, corroborando observações de outros estudos em que condições de manejo e ambiente reduziram a expressão máxima do potencial genético da cultura.

Tabela 29. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K₂O) para o valor SPAD, altura de plantas, tamanho de espigas, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga e produtividade da cultura do milho safra 2023

Tratamentos	Valor SPAD	Altura de plantas (m)	Tamanho de Espiga (cm)	Nº de fileiras por espiga	Número de Grãos por Fileira	Número de Grãos por Espiga	Produtividade kg ha ⁻¹
Fontes de K₂O							
KCl	58,27b	1,86a	12,47a	15,71a	27,20a	430,91a	1743,27a
Fonolito	61,17a	1,88a	12,24a	15,69a	28,85a	430,02a	2137,30a
Fonolito H.	63,20a	1,87a	12,51a	15,75a	27,80a	440,64a	1923,03a
DMS	2,76	0,05	0,36	0,35	1,22	18,64	410,92
Doses de K₂O kg ha⁻¹							
0	62,11 ¹	1,83 ²	12,30 ^{ns}	15,83 ³	27,42 ⁴	434,08 ⁵	1894,89 ^{ns}
25	58,80	1,86	12,28	15,49	26,84	420,60	1645,13
50	60,39	1,84	12,30	15,44	28,23	413,06	1916,49
75	60,53	1,86	12,57	15,88	28,53	453,17	1877,75
100	62,57	1,96	12,57	15,91	29,10	448,38	2338,40
CV (%)	5,89	3,55	3,80	2,89	4,38	5,61	27,64
Média	60,88	1,87	12,40	15,72	27,60	433,85	1934,53

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{ Valor SPAD} = 61,6735 - 0,0953x + 0,0011x^2$$

$$R^2=0,75$$

$$^2 \text{ Altura média de planta (cm)} = 1,8459 - 0,0012x + 0,00002x^2$$

$$R^2=0,84$$

$$^3 \text{ N}^\circ \text{ de fileiras por espiga} = 15,7783 - 0,0118x + 0,0001x^2$$

$$R^2=0,67$$

$$^4 \text{ N}^\circ \text{ de grãos por fileira} = 27,3002 - 0,0118x + 0,0002x^2$$

$$R^2=0,52$$

$$^5 \text{ N}^\circ \text{ de grãos por espiga} = 430,9121 - 0,4988x + 0,0074x^2$$

$$R^2=0,57$$

Com relação à produtividade, não ocorreu diferença estatística entre as fontes de K₂O estudadas. Numericamente, com a utilização de fonolito, a produtividade foi maior 4 sacas quando comparada à utilização de Fonolito H. e, 7 sacas quando comparada ao uso de KCl. A maior produtividade numérica pode ser resultado da liberação mais controlada de K₂O pelos remineralizadores.

A interação entre fontes e doses de K₂O foi significativa para a concentração de P foliar (Tabela 30), evidenciando que a disponibilidade de potássio no solo pode modular a absorção de fósforo pelas plantas. Embora as fontes de K₂O não tenham influenciado os teores foliares

de N, cuja média foi de 12,06 g kg⁻¹, observou-se interferência sobre as concentrações de Ca e Mg, nas quais o KCl e o Fonolito apresentaram resultados superiores ao Fonolito H. Esse comportamento sugere diferenças na dinâmica de liberação e disponibilidade dos nutrientes provenientes das fontes testadas.

A menor concentração de Ca e Mg observada com o uso do Fonolito H. pode estar relacionada à liberação mais gradual de K e, consequentemente, à menor competição entre cátions no complexo de troca. De acordo com Marschner (2012), o potássio, cálcio e magnésio competem por sítios de absorção nas membranas radiculares, de modo que o excesso de K⁺ proveniente de fontes altamente solúveis, como o KCl, tende a reduzir a absorção de Ca²⁺ e Mg²⁺. Contudo, no presente estudo, observou-se comportamento inverso, possivelmente devido à menor taxa de liberação de K do Fonolito H., o que pode ter limitado a absorção competitiva e reduzido as concentrações foliares desses cátions.

As doses de K₂O influenciaram significativamente as concentrações de Ca e Mg, com valores máximos estimados em 24,7 e 12,3 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. A partir dessas doses, observou-se tendência de redução nas concentrações foliares desses nutrientes, indicando possível efeito de antagonismo iônico com o aumento da disponibilidade de K no solo. Esse padrão tem sido amplamente relatado na literatura, conforme os resultados de Crusciol et al., (2022), que verificaram redução dos teores de Ca e Mg foliares em soja e milho quando submetidos a doses crescentes de KCl.

Por outro lado, estudos com fontes alternativas de potássio, como rochas fonolíticas e remineralizadores, têm mostrado respostas diferenciadas. Santos et al. (2025), avaliando o uso de pó de rocha fonolítico em substituição ao KCl, observaram que a liberação mais lenta de K contribuiu para um equilíbrio nutricional mais estável entre os cátions, evitando a supressão da absorção de Ca e Mg. Resultados semelhantes foram relatados por Couto (2024), que destacaram o potencial dos remineralizadores na manutenção da nutrição equilibrada das plantas em longo prazo.

Dessa forma, os resultados do presente estudo indicam que o manejo das doses e fontes de K₂O influencia não apenas a nutrição potássica, mas também o balanço entre os macronutrientes catiônicos na planta. O comportamento observado reforça a importância do uso de fontes de liberação gradual, como o Fonolito e Fonolito H., que, embora apresentem menor solubilidade imediata, podem contribuir para o fornecimento mais equilibrado de nutrientes ao longo do ciclo da cultura, reduzindo riscos de desequilíbrios nutricionais e perdas por lixiviação.

Tabela 30. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K₂O) para a concentração de macronutrientes na cultura do milho safra 2023

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg
	g kg ⁻¹				
Fontes de K ₂ O					
KCl	13,65a	2,52	12,53	4,04 a	3,72 a
Fonolito	11,20a	2,92	10,59	4,03 a	3,92 a
Fonolito H.	11,34a	2,58	12,21	3,22 b	2,50 b
DMS	2,83	0,12	1,11	0,34	1,22
Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹					
0	11,67	2,57	10,25	3,94 ¹	3,86 ²
25	14,23	2,77	10,38	4,17	3,87
50	11,43	2,66	10,87	4,02	3,76
75	12,60	2,84	13,77	3,57	2,96
100	10,38	2,54	13,60	3,11	2,46
CV (%)	30,55	5,91	12,21	11,86	34,72
Média	12,06	2,67	11,78	3,76	3,38

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{ Ca na planta} = 3,9750 + 0,0099x - 0,0002x^2 \quad R^2=0,99$$

$$^2 \text{ Mg na planta} = 3,8763 + 0,0049x - 0,0002x^2 \quad R^2=0,97$$

Para o desdobramento da interação fontes x doses de K₂O para a concentração de K foliar, observou-se que somente para o KCl houve efeito significativo das doses de K₂O, à medida que aumentaram as doses de K, aumentaram as concentrações de K. Para as fontes de K₂O, observou-se que na dose 0 kg ha⁻¹ não ocorreu diferença entre as fontes de K₂O, para a dose 25 e 100 kg ha⁻¹, a maior concentração de K foi para o KCl diferindo do fonolito e do fonolito H. e, para a dose de 50 kg ha⁻¹, a maior concentração de K foi com o uso do fonolito H. não diferindo de Fonolito. Para a dose 75 kg ha⁻¹ o Fonolito H. e o KCl obtiveram as concentrações maiores e, para a dose de 100 kg ha⁻¹ o KCl apresentou a maior concentração (Tabela 31).

O desdobramento da interação entre fontes e doses de K₂O para a concentração foliar de K demonstrou comportamento distinto entre as fontes avaliadas (Tabela 31). Observou-se que apenas para o KCl houve resposta significativa às doses de K₂O, com aumento linear da concentração foliar de K à medida que se elevaram as doses aplicadas. Esse resultado confirma

o caráter altamente solúvel e prontamente disponível do KCl, cuja liberação imediata do íon K^+ no solo favorece a rápida absorção pelas plantas (Crusciol et al., 2022; Rosolem et al., 2012).

Para as fontes de K_2O , verificou-se que na ausência de adubação potássica (0 kg ha^{-1} de K_2O) não houve diferença entre as fontes, indicando níveis basais semelhantes de K no solo ou remanescente da adubação anterior. Já nas doses de 25 e 100 kg ha^{-1} , o KCl apresentou as maiores concentrações foliares de K, diferindo estatisticamente do Fonolito e do Fonolito H. Tal comportamento evidencia o efeito imediato do KCl, cuja rápida solubilização no solo disponibiliza K em maior quantidade na solução, aumentando sua absorção.

Por outro lado, nas doses intermediárias (50 e 75 kg ha^{-1}), observou-se resposta diferenciada: o Fonolito H. proporcionou maior concentração foliar de K na dose de 50 kg ha^{-1} , não diferindo do Fonolito, e, na dose de 75 kg ha^{-1} , ambos (Fonolito H. e KCl) apresentaram as maiores concentrações. Esse resultado reforça o potencial das fontes alternativas de K com liberação gradual, que, embora apresentem menor solubilidade inicial, podem liberar o nutriente de forma contínua durante o ciclo da cultura, sustentando o teor foliar de K em estágios mais avançados do desenvolvimento da planta.

Conforme Dias et al. (2025) e Santos et al. (2025), os remineralizadores de origem fonolítica liberam K de maneira mais lenta, por meio da intemperização física e química das partículas minerais. Esse processo favorece uma nutrição mais equilibrada, reduzindo perdas por lixiviação e melhorando a eficiência de uso do potássio ao longo do tempo. Resultados semelhantes foram reportados por Nogueira et al. (2021) em soja e Oliveira et al. (2022) em milho, nos quais as fontes alternativas apresentaram desempenho comparável ao KCl quando observados períodos mais longos de liberação de K.

A superioridade do KCl nas doses mais altas (100 kg ha^{-1}) confirma, contudo, que a solubilidade da fonte é determinante para a resposta imediata da cultura. No entanto, o comportamento mais equilibrado das fontes fonolíticas em doses intermediárias indica um potencial agrônomo relevante para sistemas de médio e longo prazo, especialmente sob condições de cultivo com menor risco de lixiviação de K e manejo sustentável de fertilizantes.

Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho corroboram parcialmente os de Souza et al. (2019) e Rosolem et al. (2021), que observaram respostas mais rápidas ao KCl, mas ressaltaram o papel dos remineralizadores na manutenção de teores adequados de K foliar ao

longo do ciclo, destacando seu potencial como alternativa viável para redução do uso de fontes convencionais e melhoria da sustentabilidade do sistema produtivo.

Tabela 31. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para a concentração de potássio (K) foliar para a cultura do milho 2023

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	K foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	9,30 ¹ a	9,92 ^{ns} a	11,54 ^{ns} a
25	12,90 a	10,05 b	8,19 b
50	9,55 b	10,92 ab	12,16 a
75	14,76 a	10,30 b	16,25 a
100	16,12 a	11,78 b	12,90 b
DMS		2,47	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{ K na planta KCl} = 9,4270 + 0,0620x \quad R^2=0,64$$

O desdobramento da interação entre fontes e doses de K₂O para a concentração foliar de P revelou comportamento distinto entre as fontes avaliadas (Tabela 31). Observou-se efeito significativo das doses de K₂O para o Fonolito e o Fonolito H., sendo as maiores concentrações foliares de P obtidas com as doses de 25 e 70,0 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. Esses resultados indicam que a aplicação de potássio, especialmente quando associada a fontes de liberação gradual, pode influenciar positivamente a absorção de fósforo, possivelmente por efeitos indiretos sobre a dinâmica de nutrientes no solo e no sistema radicular.

De acordo com Marschner (2012), o potássio desempenha papel essencial na regulação de processos fisiológicos que afetam a absorção de outros nutrientes, incluindo o fósforo. O aumento da concentração foliar de P observado nas doses intermediárias de K₂O com o uso de fontes alternativas, como o Fonolito, pode estar relacionado à melhoria da atividade radicular e à manutenção de um ambiente rizosférico mais equilibrado, o que favorece a disponibilidade e absorção de P.

Além disso, as fontes remineralizadoras, como o Fonolito e o Fonolito H., contêm em sua composição minerais acessórios (como feldspatos e micas) que, além de liberar K, podem liberar pequenas quantidades de outros nutrientes, incluindo P, Ca e micronutrientes (Dias et al., 2025; Santos et al., 2025). Essa característica contribui para o aumento gradual da concentração foliar de P, mesmo em doses moderadas de K₂O.

Para as fontes de K₂O, observou-se diferença significativa apenas nas doses de 0, 25 e 50 kg ha⁻¹ de K₂O, nas quais o Fonolito apresentou concentrações foliares de P superiores às demais fontes. Esse resultado sugere que, em doses mais baixas de K₂O, as fontes de liberação lenta podem exercer efeito residual positivo na absorção de fósforo, possivelmente por reduzir a competição iônica entre K⁺ e outros cátions, como Ca²⁺ e Mg²⁺, que interagem com o P na solução do solo (Souza & Lobato, 2004).

Nas doses mais elevadas (75 e 100 kg ha⁻¹), não foram observadas diferenças significativas entre as fontes, indicando que a disponibilidade de P tornou-se suficiente para suprir as necessidades da planta independentemente da fonte de K utilizada. Resultados semelhantes foram relatados por Rosolem et al. (2021) e Nogueira et al. (2021), que destacaram que, a partir de determinados níveis de potássio no solo, o efeito sobre a absorção de P tende a estabilizar-se devido ao equilíbrio iônico e à saturação dos sítios de absorção nas raízes.

Dessa forma, os resultados deste estudo demonstram que as fontes alternativas de K, como o Fonolito e o Fonolito H., podem contribuir para uma nutrição mais equilibrada das plantas, favorecendo não apenas o suprimento de K, mas também a absorção de P — especialmente em sistemas de manejo com doses moderadas de fertilizante. Essa característica reforça o potencial dos remineralizadores como substitutos parciais de fertilizantes solúveis, promovendo maior sustentabilidade no manejo da adubação potássica.

Tabela 32. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para a concentração de fósforo (P) foliar para a cultura do milho 2023

Doses de K ₂ O kg ha ⁻¹	P foliar (g kg ⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	2,46 ^{ns} b	2,87 ¹ a	2,40 ² b
25	2,75 b	3,16 a	2,42 c
50	2,14 c	3,08 a	2,75 b
75	2,71 a	2,98 a	2,82 a
100	2,57 a	2,51 a	2,53 a
DMS		0,27	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ P na planta Fonolito = 2,8781 + 0,0141x – 0,0002x²

R²=0,97

² P na planta Fonolito H. = 2,3216 + 0,0126x – 0,00009x²

R²=0,68

A interação fontes x doses de K₂O foi significativa para a concentração de Mn e Fe (Tabela 33). As fontes de K₂O influenciaram as concentrações de Cu e Zn, a maior concentração foi quando utilizado o Fonolito. As doses K₂O não influenciaram a concentração de Cu e Zn

(Tabela 33). indicando que a disponibilidade e absorção desses micronutrientes foram moduladas pela forma e quantidade de potássio aplicada. O efeito diferencial das fontes pode estar associado à solubilidade e à dinâmica de liberação dos nutrientes no solo, o que influencia a absorção competitiva entre cátions e a mobilidade de micronutrientes na rizosfera.

De acordo com Marschner (2012) e Taiz et al. (2017), o potássio exerce influência indireta sobre a absorção de micronutrientes, especialmente Mn e Fe, por alterar o potencial redox do solo e o equilíbrio iônico na solução. Fontes de K de liberação mais lenta, como o Fonolito e o Fonolito H., tendem a liberar K de forma gradativa, mantendo o equilíbrio iônico e reduzindo o risco de antagonismo com outros nutrientes essenciais. Esse comportamento pode explicar a resposta diferenciada na absorção de Mn e Fe observada neste trabalho.

As fontes de K_2O também influenciaram as concentrações foliares de Cu e Zn, sendo que o uso do Fonolito resultou nas maiores concentrações desses micronutrientes. Esse resultado está de acordo com Santos et al. (2025) e Dias et al. (2025), que relataram que remineralizadores como o Fonolito, por possuírem uma matriz mineral complexa, liberam não apenas K, mas também pequenas quantidades de micronutrientes, incluindo Cu, Zn e Mn, ao longo do tempo. Essa liberação gradual contribui para o aumento da disponibilidade desses elementos no solo e, conseqüentemente, na planta.

Por outro lado, as doses de K_2O não influenciaram significativamente as concentrações de Cu e Zn, indicando que a absorção desses micronutrientes foi mais afetada pela fonte do que pela quantidade de K aplicada. Esse comportamento corrobora os resultados de Nogueira et al. (2021), que observaram estabilidade na absorção de micronutrientes em diferentes doses de K, sugerindo que a resposta das plantas a esses elementos depende mais do balanço entre os nutrientes do que do nível absoluto de potássio no solo.

Assim, os resultados obtidos neste estudo reforçam que fontes alternativas de K, como o Fonolito, além de fornecer potássio de forma gradual, podem favorecer a disponibilidade de micronutrientes essenciais, contribuindo para uma nutrição mineral mais equilibrada e sustentável das plantas. Essa característica é especialmente relevante em sistemas agrícolas que buscam reduzir a dependência de fertilizantes altamente solúveis e de origem industrial, promovendo o uso eficiente de recursos naturais.

Tabela 33. Efeito residual de fontes e doses de potássio (K_2O) para concentração de micronutrientes na cultura do milho safra 2023

Tratamentos	Cu	Mn	Fe	Zn
Fontes de K_2O	mg kg⁻¹			
KCl	7,71b	37,40	215,91	19,09b
Fonolito	9,83 ^a	63,39	259,73	23,72 ^a
Fonolito H.	7,85b	44,69	267,52	16,88b
DMS	1,69	6,82	53,48	2,92
Doses de K_2O				
kg ha⁻¹				
0	8,38 ^{ns}	49,66	296,98	20,68 ^{ns}
25	9,71	60,88	277,93	23,59
50	9,09	47,80	224,00	19,93
75	8,00	44,23	234,79	18,74
100	7,13	39,88	204,92	16,56
CV (%)	25,98	17,93	28,09	19,12
Média	8,47	48,49	247,72	19,90

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de K_2O para a concentração de Mn foliar para a cultura do milho, houve efeito significativo das doses de K_2O apenas para o fonolito, o ponto máximo foi com a dose 34,4 kg ha⁻¹ de K_2O . Para as fontes de K_2O , observou-se que apenas na dose 100 kg ha⁻¹ não ocorreu diferença significativa, para as doses de 0, 25, 50 e 75 kg ha⁻¹, a maior concentração de K foi para a fonte fonolito diferindo do fonolito H e do (Tabela 34).

O desdobramento da interação entre KCl fontes e doses de K_2O para a concentração de manganês (Mn) foliar no milho indicou efeito significativo das doses apenas para o Fonolito, com ponto máximo estimado na dose de 34,4 kg ha⁻¹ de K_2O (Tabela 34). Esse comportamento sugere que a liberação gradual de potássio a partir do Fonolito pode ter favorecido condições iônicas mais equilibradas na rizosfera, promovendo maior disponibilidade e absorção de Mn pelas plantas em doses intermediárias.

Entre as fontes avaliadas, observou-se diferença significativa nas doses de 0, 25, 50 e 75 kg ha⁻¹ de K_2O , sendo que o Fonolito proporcionou as maiores concentrações foliares de Mn em comparação ao Fonolito H. e ao KCl, que apresentaram valores inferiores. Apenas na dose de 100 kg ha⁻¹ de K_2O não houve diferença significativa entre as fontes, o que indica que em doses elevadas o aumento da concentração de potássio pode ter reduzido a absorção de Mn

devido a efeitos de antagonismo iônico entre K^+ e Mn^{2+} nas membranas radiculares, conforme descrito por Marschner (2012) e Taiz et al. (2017).

Resultados semelhantes foram reportados por Nogueira et al. (2021) e Santos et al. (2020), que observaram redução na absorção de Mn em cultivos de milho e soja com o aumento das doses de K, especialmente quando o potássio foi fornecido na forma de KCl, devido ao rápido aumento da concentração de K^+ na solução do solo. Em contrapartida, remineralizadores como o Fonolito apresentam liberação lenta e contínua de K, o que reduz o efeito competitivo com micronutrientes e permite uma absorção mais equilibrada ao longo do ciclo da cultura (Dias et al., 2025; Santos et al., 2025).

Esses resultados reforçam o potencial agrônômico do uso do Fonolito como fonte alternativa de potássio, capaz de contribuir não apenas para o suprimento gradual desse macronutriente, mas também para uma nutrição mais equilibrada em micronutrientes como o manganês. Essa característica o torna uma opção promissora em sistemas agrícolas sustentáveis, especialmente em solos de baixa fertilidade natural e sob manejo de longo prazo.

Tabela 34. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de manganês (Mn) foliar para a cultura do milho 2023

Doses de K_2O $kg\ ha^{-1}$	Mn foliar ($mg\ kg^{-1}$)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	41,91 ^{ns} b	60,23 ¹ a	46,84 ^{ns} ab
25	42,31 b	90,39 a	49,94 b
50	34,75 b	64,81 a	43,84 b
75	34,88 b	58,97 a	38,86 b
100	33,15 a	42,56 a	43,95 a
DMS		0,27	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

$$^1 \text{ Mn na planta Fonolito} = 66,2571 + 0,5718x - 0,0083x^2$$

$$R^2=0,70$$

Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K_2O) para a concentração de ferro (Fe) foliar para a cultura do milho, houve efeito significativo das doses de K_2O apenas para o KCL, o ponto máximo de concentração do Fe foi com a dose 0 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O . Para as fontes de K_2O , observou-se que nas doses 0, 50 e 100 $kg\ ha^{-1}$ não ocorreu diferença significativa, para as doses 25 $kg\ ha^{-1}$, a maior concentração de K foi para a fonte fonolito diferindo do fonolito H e do KCL, na dose 75 $kg\ ha^{-1}$ a maior concentração foi para o fonolito H. (Tabela 35).

O desdobramento da interação entre fontes e doses de K_2O para a concentração de ferro (Fe) foliar na cultura do milho mostrou que houve efeito significativo das doses de K_2O apenas para o KCl, com o ponto máximo de concentração de Fe obtido na dose de 0 kg ha^{-1} de K_2O (Tabela 35). Esse resultado indica que o aumento nas doses de potássio, especialmente quando fornecido na forma altamente solúvel de KCl, pode reduzir a absorção de Fe pelas plantas. Tal comportamento é frequentemente atribuído ao antagonismo iônico entre K^+ e Fe^{2+}/Fe^{3+} , fenômeno que ocorre devido à competição entre cátions na superfície das raízes, limitando a absorção de ferro em altas concentrações de potássio na solução do solo (Marschner, 2012; Taiz et al., 2017).

Entre as fontes de K_2O , observou-se que nas doses de 0, 50 e 100 kg ha^{-1} não houve diferença significativa, sugerindo comportamento semelhante entre as fontes em doses extremas (ausência ou excesso de K). No entanto, para a dose de 25 kg ha^{-1} , a maior concentração foliar de Fe foi obtida com a utilização do Fonolito, diferindo estatisticamente do Fonolito H. e do KCl. Já na dose de 75 kg ha^{-1} , o maior teor de Fe foi observado com o Fonolito H., indicando que o fornecimento mais gradual de potássio por meio dos remineralizadores favoreceu condições químicas do solo mais estáveis e menor competição iônica, permitindo melhor absorção de Fe.

Esses resultados corroboram os achados de Soratto et al. (2021) e Nogueira et al. (2021), que observaram maior disponibilidade e absorção de Fe em plantas de milho e soja quando fontes de liberação lenta de potássio, como o Fonolito, foram utilizadas em substituição parcial ao KCl. De acordo com Dias et al. (2025), o uso de remineralizadores pode contribuir para o equilíbrio entre macro e micronutrientes, evitando o desequilíbrio nutricional induzido por fontes altamente solúveis.

Assim, observa-se que o uso do Fonolito e do Fonolito H. apresenta potencial agrônomo como fontes alternativas de K_2O , proporcionando melhor equilíbrio nutricional, especialmente no que diz respeito à absorção de micronutrientes como o Fe, reduzindo os efeitos negativos da competição iônica observada com o KCl.

Tabela 35. Desdobramento da interação do efeito residual de fontes com doses de potássio (K₂O) para a concentração de ferro (Fe) foliar para a cultura do milho 2023

Doses de K₂O kg ha⁻¹	Fe foliar (mg kg⁻¹)		
	Fontes de Potássio		
	KCl	Fonolito	Fonolito H.
0	282,88 ¹ a	264,81 ^{ns} a	343,18 ^{ns} a
25	265,19 b	390,82 a	177,77 b
50	197,80 a	231,49 a	242,72 a
75	185,17 a	241,77 a	277,43 b
100	148,49 a	208,71 a	257,57 a
DMS		119,57	

Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

¹ Fe na planta KCl = 285,6655 – 1,3952x

R²=0,96

CONCLUSÃO

A produtividade da soja foi influenciada pelas condições climáticas e pelo manejo de fontes e doses de K_2O . Em condições de déficit hídrico (2021/22), as produtividades foram reduzidas, com destaque para o Fonolito H., enquanto em ambiente mais favorável (2022/23) observaram-se maiores rendimentos, especialmente com KCl e Fonolito H. em doses intermediárias. O fonolito apresentou desempenho inferior, associado à sua liberação mais lenta de nutrientes. As concentrações foliares de macronutrientes variaram conforme safra, fonte e dose de K_2O , evidenciando antagonismo entre K, Ca e Mg, principalmente com o uso de KCl, enquanto o Fonolito H. mostrou efeito mais equilibrado. Para os micronutrientes, Zn, Mn e Fe permaneceram, em geral, em níveis adequados, enquanto Cu apresentou teores baixos em ambas as safras, indicando possível limitação ou interação negativa com o potássio. Na cultura do milho, as fontes de K_2O não diferiram significativamente quanto à produtividade de grãos, indicando que remineralizadores podem substituir o KCl sem prejuízo ao rendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAKMAK, I. Protection of plants from detrimental effects of environmental stress factors. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Potafos, 2005. 841 p. Disponível em: <https://www.editoraufv.com.br/potassio-na-agricultura-brasileira/p>.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van & CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas/Fundação IAC, 1997. p.45-71. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/boletim100.php>.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Projeto Poços de Caldas: relatório final*. Rio de Janeiro: CPRM, 1978. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/items/656f0e41-5fc4-4327-9a01-fd23778f3b53>.

COUTO, E. S.; COUTINHO, A. P. N.; SOUZA, Á. H. C. de. Uso de remineralizador como fonte alternativa de fósforo e potássio na produção de feijão comum. *[nome da revista]*, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n12-272. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/download/8431/5300/20168>.

DA SILVA, L. N.; DA SILVA, C. E. S. da; LIMA, R. E.; OLIVEIRA, M. F. de; OLIVEIRA, J. L. G. Componentes produtivos do milho são influenciados pela irrigação e doses de potássio. In: CIÊNCIA EM FOCO: VOLUME V. [S.l.]: [s.n.], 2021. p. 19-29. DOI: 10.46420/9786588319956cap2. Disponível em: <https://doi.org/10.46420/9786588319956cap2>. Acesso em: 5 out. 2025.

DIAS, Ricardo de Castro. Potencial e Eficiência da Utilização de Rochas Silicáticas como Fonte de Potássio na Agricultura. Tese de Doutorado. UFRRJ Instituto de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo. 2022. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/20268>.

DIAS, R. C.; ZONTA, E.; TEIXEIRA, P. C.; ALVES, B. J. R.; CASTRO, C. de; VENEU, D. M.; ARAÚJO, E. da S.; MATTIELLO, E. M.; BONA, F. D. de; OLIVEIRA, F. A. de; CANTARELLA, H.; SOUZA, H. A. de; ZILLI, J. E.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos;

POLIDORO, J. C.; GUILHERME, L. R. G.; CARVALHO, M. da C. S.; MONTE, M. B. de M.; MORAES, M. F. de; PAVINATO, P. S.; NUNES, R. de S.; CANTARUTTI, R. B.; ALMEIDA, R. E. M. de; STRALIOTTO, R.; URQUIAGA, S.; SCIVITTARO, W. B.; BENITES, V. de M. **Agrominerais silicáticos são fontes eficientes de potássio para plantas cultivadas? Uma meta-análise.** In: BRUNETTO, G.; ROZANE, D. E.; LOSS, A.; SOUZA, H. A. de (ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2025. v. 13, p. 392-450. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/396083604_Agrominerais_silicaticos_sao_fontes_eficientes_de_potassio_para_plantas_cultivadas_Uma_meta-analise.

DUARTE, W. M.; MAFRA, A. L.; FORESTI, M. M.; PICCOLA, C. D.; ALMEIDA, J. A. Potencial de olivina melilitito, granito e sienito nefelínico na disponibilização de potássio em solos. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 12, p. 68-77, 2013. Disponível em: https://periodicos.udesc.br/index.php/agroveterinaria/pt_BR/article/view/5200.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Tecnologia de produção de soja: região central do Brasil – 2011*. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 255 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, n. 15).

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computerstatisticalanalysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

GASPAR, L. P.; FURLANI, P. R.; CÂMARA, T. A. Marcha de absorção de nutrientes pela soja. Piracicaba: Embrapa Soja, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/226978/1/Dissertacao-SETUBAL-IS.pdf>. Acesso em: 05 out. 2025.

GIL, P.T. *Índices e eficiência de utilização de nitrogênio pela batata influenciados por doses de nitrogênio em pré-plantio e em cobertura* Viçosa: UFV. 81 p. 2001. (Tese mestrado)

HAYNES, R. J. Significance and Role of Si in Crop Production. In: *Advances in Agronomy*. ed. D. L. Sparks (San Diego, CA: Elsevier Academic Press Inc.), v. 146, p. 83–166. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318871948_Significance_and_Role_of_Si_in_Crop_Production.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MARSCHNER, P. Mineral Nutrition of Higher Plants. 3. ed. London: Academic Press, 2012. Disponível em: https://home.czu.cz/storage/737/65060_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf.

MEDINA, P.F. Produção de sementes de cultivares precoces de soja, em diferentes épocas e locais do Estado de São Paulo 1994. 173f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-20210104-185025/pt-br.html>.

NEUMANN, R. Caracterização Mineralógica e Tecnológica da Rocha Potássica do Estéril da Mina Osami Utsumi, Caldas (MG), Como Subsídio à Extração do Potássio, Projeto Fontes Alternativas de Potássio para Fertilizantes. CETEM-CTM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

NEUMANN, R. *Petrogênese e aspectos geoquímicos do maciço alcalino de Poços de Caldas (MG-SP)*. 2002. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

NOGUEIRA, T. A. R.; MIRANDA, B. G.; JALAL, A.; LESSA, L. G. F.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; MARCANTE, N. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; MOREIRA, A.; MARTINS, É. de S. Nepheline syenite and phonolite as alternative potassium sources for maize. *Agronomy*, v. 11, n. 7, p. 1385, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11071385. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/7/1385>.

OLIVEIRA, Caroline de Figueiredo. Dinâmica do potássio e resposta do milho à fertilização com fonte organomineral em solo franco-arenoso. 2024.

OLIVEIRA, C.F. Dinâmica do potássio e resposta do milho à fertilização com fonte organomineral em solo franco-arenoso. 2024. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024. doi:10.11606/D.11.2024.tde-13032024-163413. Acesso em: 2026-03-10. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003185421>.

OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 5ª ed., Brasília: EMBRAPA Solos, 356p. 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>.

OLIVEIRA, S.; LEMES, E. S.; MENEGHELLO, G. E.; TAVARES, L.C.; BARROS, A. C. S. A. Aplicação de silício via solo no rendimento e na qualidade fisiológica de sementes de soja. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 36, n. 5, p. 3029–3042, 2015. Disponível em: <https://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/download/17074/17152>.

PEDRO, Guilherme Victor Vieira. Épocas de aplicação e doses alternativas de potássio na cultura do algodão no Cerrado. 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/612c2b1d-0a2d-4ead-a08f-eb3e51d606d7>.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da; CAMPOS, M. de; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. *Broadcast application of ground silicate rocks as potassium sources for grain crops. Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, p. e02443, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02443. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/xqnKqtnKpcgdjb6kL9ZfbYy/?lang=en>. Acesso em: 19 fev. 2026.

QUEIROZ, E.F.; NEUMAIER, N.; TORRES, E.; PEREIRA, L.A.G.; BIANCHETTI, A.; TERAZAWA, F.; PALHANO, J.B.; YAMASHITA, J. Recomendações técnicas para a colheita mecânica. In: MIYASAKA, S., MEDINA, J.C. (Ed.). *A soja no Brasil* Campinas: ITAL, 1981. p.701-10.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, S. H. da; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAREMA, J. A.; FURLANI, A. M. C. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais: métodos utilizados pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo do IAC*. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 1997. 285 p. Circular Técnica 50. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso em: 05 out. 2025.

RIBEIRO, M. C.; MARTINS, A. R.; ALVES, R. S.; LESSA, L. G. F.; PEREIRA, H. S.; GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ABREU-JUNIOR, C. H.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Basalt rock dust as a soil remineralizer in

upland rice grown in tropical soils: residual effects on soil fertility, Si availability, and leaf anatomy. *Journal of Cleaner Production*, v. 520, 146063, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146063.

ROSOLEM, C. A.; SANTOS, F. P. dos; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. *Potassium leaching in soil as affected by fertilization over the millet straw and simulated rain. Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1033–1040, 2006. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2006.v41.7242. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/bH4TSBF6KskrLBkmNKfpqxQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 out. 2025.

ROSOLEM, C. A.; VICENTINI, J. P. T. M. M.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1507-1515, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wz9MJjMTCL7ZgwmBmngXGtG/?lang=pt>.

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; DURLI, M. M.; LEOLATO, L. S.; COELHO, A. E.; KUNESKI, H. F.; OLIVEIRA, V. de L. Estratégias de manejo do arranjo de plantas visando otimizar a produtividade de grãos do milho. *International Journal of Maize & Sorghum*, v. 18, n. 1, p. 47–60, 2019. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v18n1p47-60. Disponível em: <https://rbms.sede.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/956>.

SANTOS, E.S.; CARVALHO, A.H.O.; CAMARA, G.R. Caracterização e uso de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de mudas de tomateiro. *Brazilian Journal of Development*, v.7, n.9, p.91480-91498, 2021. Disponível em: <http://master.cetem.gov.br/handle/cetem/2495>.

SANTOS, J. E. D. DOS, MENEZES FILHO, A. C. P. DE, MELO, A. F., SHARMA, P., & VENTURA, M. V. A. Effect of potassium silicate on development and productivity in soybean cultivars in an experimental cultivation area in the Brazilian Cerrado. *Brazilian Journal of Science*, v. 3, n. 7, p. 76–88, 2024. Disponível em: <https://periodicos.cerradopub.com.br/bjs/article/view/586>.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. de A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de;

OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-1176834/Description>.

SANTOS, O. S. N.; PAZ, V. P. da S.; GLOAGUEN, T. V.; TEIXEIRA, M. B.; FADIGAS, F. de S.; COSTA, J. A. Crescimento e estado nutricional de helicônia irrigada com água residuária tratada em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 846–853, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800002>.

SANTOS, L. F. dos; ABRANTES, E. G. de; MARCHI, G.; MARTINS, É. de S. Inovações na fertilização do solo e o papel dos remineralizadores. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 21, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17271/1980082721120255744>.

SILVA, F. C. (org.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; COSTA, C. H. M. da; GILABEL, A. P.; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Silicate rocks as an alternative potassium fertilizer for upland rice and common bean crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.56, e01411, 10 p., 2021a. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01411>. Disponível em : <https://www.scielo.br/j/pab/a/PGjJQNXHvckVqTcGKBSVCzy/?lang=en>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M. de; GILABEL, A. P.; COSTA, C. H. M. da; CASTRO, G. S. A.; FERRARI NETO, J. Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.56, 10 p., 2021b. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02686>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/SSMbJTjcdkqPDdbGj6CsPyn/abstract/?lang=pt>.

SORATTO, R. P., CRUSCIOL, C. A. C., CAMPOS, M. DE, GILABEL, A. P., COSTA, C. H. M. DA, CASTRO, G. S. A., & FERRARI NETO, J. Efficiency and residual effect of alternative potassium sources in grain crops. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 56(Y), e02686. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.27069>.

SORATTO E CRUSCIOL. Efeito do uso da técnica de rochagem associada à adubação orgânica em solos tropicais. In II Congresso Brasileiro de Rochagem. p.312. 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/295099176_Anais_do_II_Congresso_Brasileiro_de_Rochagem_coletanea_de_varios_autores.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., ed. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUZA, G. M.; LOBATO, A. K. S. *Nutrição mineral de plantas: aspectos fisiológicos e aplicações*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2004. 232 p.

SOUZA, R. A.; LIMA, M. J. G.; MENDES, L. A. O. *Fontes alternativas de potássio na adubação da soja e seus efeitos sobre a absorção de micronutrientes*. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 15, n. 4, p. 1–12, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia vegetal e desenvolvimento vegetal*. 6ªed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2017. (CPRM, 1978).

VIANA, M. B.; THEODORO, S. H.; GOMIDE, C. S.; MEDEIROS, F. P.; RAMOS, C. G. *Avanços e inovações da tecnologia da rochagem no Brasil*. **Revista Novo Solo**, v. 10, n. 2, p. 1–10, 2025. Disponível em: <https://revistanovosolo.org.br/2025/07/11/avancos-e-inovacoes-da-tecnologia-da-rochagem-no-brasil/>. Acesso em: 05 out. 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nas duas safras demonstram que o desempenho das fontes de potássio é fortemente influenciado pelas condições climáticas, especialmente pela disponibilidade hídrica. Em situações de estresse por déficit hídrico, como observado na safra 2021/22, o Fonolito Hidrotermalizado apresentou comportamento superior, evidenciando maior eficiência na liberação e no aproveitamento do K em condições adversas. Em contrapartida, sob condições mais favoráveis de umidade, o KCl e o Fonolito H. proporcionaram produtividades mais elevadas, principalmente em doses intermediárias, reforçando a importância do manejo equilibrado da adubação potássica conforme o ambiente de cultivo.

O comportamento dos teores foliares de macro e micronutrientes mostrou que as fontes de K_2O influenciam não apenas a disponibilidade de potássio, mas também o equilíbrio nutricional da planta. O KCl se destacou pela maior eficiência na absorção de K, porém com redução dos teores de Ca e Mg, em razão do antagonismo iônico. O Fonolito H., por sua vez, apresentou efeito mais equilibrado sobre os nutrientes, o que o torna uma alternativa promissora e ambientalmente sustentável ao uso exclusivo de fertilizantes solúveis.

Quanto aos micronutrientes, observou-se manutenção dos teores adequados de Zn, Mn e Fe, mas com tendência de deficiência de Cu, possivelmente associada à interação negativa com o K ou à baixa disponibilidade no solo. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento nutricional contínuo e de um manejo integrado de fertilização que considere tanto as interações químicas quanto as condições ambientais.

Para o acúmulo de K, logo após a safra 2021/2022, o maior acúmulo de K, principalmente nas doses elevadas de KCl, indicando alta solubilidade e liberação imediata desse fertilizante. Os remineralizadores de apresentam liberação mais gradual, com incremento progressivo do K acumulado ao longo das extrações, sugerindo maior efeito residual. Após a safra do milho 2024, os teores totais de K foram menores, porém manteve-se a tendência de aumento com o número de extrações. O KCl continuou apresentando maior disponibilidade imediata, enquanto os remineralizadores mantiveram comportamento de liberação lenta e contínua. Neste sentido conclui-se, que o acúmulo de K no solo depende da fonte e da dose aplicadas, sendo o KCl mais eficiente em curto prazo e as fontes remineralizadoras mais indicadas para o fornecimento gradual e sustentado do nutriente ao longo do tempo.

De modo geral, o uso de fontes alternativas de potássio, como o Fonolito Hidrotermalizado, apresenta potencial para substituir parcial ou totalmente o KCl em sistemas agrícolas, promovendo maior sustentabilidade e eficiência do uso de nutrientes. Recomenda-se, contudo, a continuidade de estudos de longo prazo, envolvendo diferentes tipos de solo, regimes hídricos e culturas, a fim de validar os efeitos observados e consolidar o uso desses remineralizadores na agricultura tropical.