contecc 2026
CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA

POTASSIFICAÇÃO E FORMAÇÃO DE FLOGOPITITOS: ROCHAS DE INTERESSE PARA ROCHAGEM

CAMILA REIS DE SOUZA[1], SIMONE CERQUEIRA PEREIRA CRUZ[2]

[1]Eng. de Minas, IFBA, Mª em Ciências Ambientais, Doutoranda em Geologia, UFBA, Prof. EBTT, IFBA Campus Brumado, Brumado-BA, camila.reis03@gmail.com.br;
[2] Geóloga, Drª em Geologia Evolução Crustal e Recursos Naturais, Prof. Ass. do IGEO, UFBA, Pós-Doutotarado em Petrologia, Metalogênese e Exploração Mineral, UFBA, Salvador-BA, simonecruzufba@gmail.com;

RESUMO: A potassificação é um processo metassomático caracterizado pela introdução de potássio em rochas preexistentes por meio da circulação de fluidos hidrotermais, diagenéticos ou metamórficos, promovendo alterações mineralógicas sem fusão da rocha. Entre os produtos desse processo destaca-se a formação da flogopita, mica potássica rica em magnésio, cuja ocorrência está associada a ambientes metamórficos e metassomáticos. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica utilizando trabalhos clássicos e recentes sobre metassomatismo potássico e sua relação com a formação da flogopita. São discutidas as principais implicações tecnológicos e ambientais que influenciam a disponibilidade gradual de K para aplicação como remineralizadores e os benefícios ambientais decorrentes da aplicação de rochagem, como a valorização de resíduos da mineração, melhoria da fertilidade de solos tropicais e o potencial sequestro de carbono. Além da redução da dependência de fertilizantes potássicos importados, contribuição para a segurança alimentar e a soberania nacional.

PALAVRAS-CHAVE: Potassificação; Rochagem; Flogopita; Metassomatismo potássico; fertilizantes potássicos.

POTASSIFICATION AND PHLOGOPITITE FORMATION: ROCKS OF INTEREST FOR ROCK-BASED SOIL REMINERALIZATION

ABSTRACT: Potassification is a metasomatic process characterized by the introduction of potassium into pre-existing rocks through the circulation of hydrothermal, diagenetic, or metamorphic fluids, promoting mineralogical alterations without rock melting. A notable product of this process is the formation of phlogopite—a magnesium-rich potassic mica—whose occurrence is associated with metamorphic and metasomatic environments. This study presents a literature review drawing on both classic and recent works regarding potassic metasomatism and its relationship to phlogopite formation. It discusses key technological and environmental implications influencing the gradual availability of K for use as a soil remineralizer, as well as the environmental benefits of "rock dusting" (rock-based soil amendment), such as the valorization of mining waste, improved tropical soil fertility, and potential carbon sequestration. Additionally, it addresses the reduction of dependence on imported potassium fertilizers and the contribution to food security and national sovereignty.

KEYWORDS: Potassification; Rock dusting; Phlogopite; Potassic metasomatism; Potassic fertilizers

1 INTRODUÇÃO

Metassomatismo é um processo caracterizado por substituições íon-por-íon em minerais e pode gerar mudanças substanciais na composição da rocha-total, tanto pela adição como pela subtração em elementos químicos e voláteis como H_2O e CO_2 (FETTES; DESMONS, 2007; HOERLLE, 2021). Ou seja, o processo constitui uma troca de componentes químicos entre os fluidos e as rochas encaixantes (PIRAJNO, 2009, 2014; CORRIVEAU e MONTREUIL, 2025). De acordo com Pirajno (2009, 2014), metassomatismo ocorre pela troca de massa entre fluido e rocha; dissolução dos minerais primários;

precipitação de novos minerais em equilíbrio com o fluido; possível alteração da própria composição química do fluido durante a interação.

Por sua vez, para Hoerlle (2021) esse processo pode ocorrer por dois mecanismos principais: (i) difusão, em que o soluto se desloca por gradientes de atividade química ao longo de fraturas e superfícies de contato, gerando corpos finos e zonados (franjas), com variações graduais na composição mineral; e (ii) infiltração, em que o fluido se move passivamente transportando os elementos dissolvidos, motivada pela pressão e por gradientes de concentração. Segundo esse autor, as rochas formadas por metassomatismo por infiltração ocupam volumes maiores, quando comparadas as formadas por difusão. Ainda, o metassomatismo seria um processo heterogêneo, gerando zonas com distintas composições e intensidades de alterações, mas com composição mineral relativamente constante ao longo de cada zona.

Os fluidos metassomáticos podem ter diferentes origens: fluidos pré-existentes nos poros da rocha hospedeira (Fluidos bacinais), fluidos metamórficos gerados por reações de desvolatilização, fluidos magmáticos liberados durante a cristalização de intrusões ígneas, águas meteóricas, que infiltram na crosta e podem aquecer-se e reagir com as rochas e fluidos mantélicos, especialmente em ambientes de subducção e riftes intracontinentais (EVANS e TOMKINS, 2020; HOERLLE, 2021). Do ponto de vista da geologia econômica, o metassomatismo adquire especial relevância como mecanismo de concentração mineral, especialmente na formação de flogopititos (BROD et al., 2001, EVANS e TOMKINS, 2020; CODILLO et al., 2022).

A agricultura em solos tropicais possui elevada dependência de fertilizantes potássicos solúveis, especialmente em solos altamente intemperizados e pobres em nutrientes, como é o caso dos solos nordestinos (ZARNI, 2021). O mercado de fertilizantes é dominado por poucos países (Rússia, China, Canadá e Marrocos), que produzem mais de 80% do K distribuído globalmente (CARDOSO, 2025). O Brasil destaca-se como grande importador de fertilizantes minerais, particularmente de potássio, tornando o setor agrícola vulnerável a oscilações econômicas e geopolíticas internacionais (BENEVIRDES FILHO et al., 2023).

Nesse contexto, a rochagem vem sendo estudada como alternativa complementar para o fornecimento de nutrientes ao solo, entre eles o K, utilizando pós de rochas silicáticas, como flogopititos, capazes de liberar macro e micronutrientes gradualmente. Dessa forma, este trabalho objetiva discutir a potassificação como processo geológico associado à formação de flogopita, abordando seus fundamentos geoquímicos, contextos geológicos, potencial agronômico para aplicação na rochagem e implicações tecnológicas, ambientais e regulatórias.

2 POTASSIFICAÇÃO E A FORMAÇÃO DA FLOGOPITA

A formação de flogopita em terrenos metamórficos, em especial, migmatíticos, é um processo complexo influenciado por vários fatores geológicos e químicos (WANG et al., 2024). De acordo com esse trabalho, esse mineral, uma mica com cerca de 8–10% de K_2O e rica em magnésio, está hospedada principalmente em rochas metaultramáficas (DEER et al. 2013; PEREIRA; GOMES, 2021). Neste contexto, esse filossilicato se forma por meio de processos metamórficos e metassomáticos de potássico, processo pelo qual fluidos ou fundidos ricos em K interagem com rochas hospedeiras no estado sólido, modificando sua composição mineralógica (PEREIRA; GOMES, 2021). Outro processo de geração de flogopita é quando rochas silicáticas, ultramáficas e mantélicas, ricas em magnésio, tais como peridotitos, harzburgitos, lherzolitos, são submetidas à metassomatismo decorrente da alteração por fluidos/fundidos (SAFONOV et al., 2019; WANG et al., 2024). Esse processo introduz potássio, alumínio e voláteis no manto, estando frequentemente associado a zonas de subducção, bem como com atividade de plumas ricas em fluidos ou em contexto de colisão continental.

Esse mineral também ocorre frequentemente em zonas de metamorfismo de contato, em que fluidos hidrotermais interagem com rochas sedimentares ricas em magnésio, como calcários dolomíticos silicosos. A flogopita atua ainda como reservatório preferencial de LILE (Li, Ba, Rb) e HFSE (Nb, Ta) em rochas básicas–ultrabásicas ou rochas carbonatadas ricas em magnésio, tornando sua química um

registro importante das condições e da fonte dos fluidos metassomáticos (WANG et al., 2024; SAFONOV et al., 2019).

3 POTASSIFICAÇÃO E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA PARA ROCHAGEM

Flogopita é um mineral que possui relevância estratégica para a agricultura devido à capacidade de liberação gradual de nutrientes e à possibilidade de utilização como remineralizadores de solo sendo fonte de disponibilização de potássio (THEODORO et al., 2026; BERGMAN, 2016a; BERGMAN, 2016b; SILVA, 2010b).

Em solos tropicais fortemente intemperizados, remineralizadores mostram vantagens importantes com relação à fertilização e produtividade, apresentando aspectos como: menor lixiviação, fornecimento gradual de nutrientes, melhoria da capacidade de troca catiônica (CTC), aumento da atividade biológica do solo e maior estabilidade geoquímica. Além do fornecimento de K, muitos materiais potassificados disponibilizam também cálcio, magnésio, silício e micronutrientes.

4 IMPLICAÇÕES REGULATÓRIAS, TECNOLÓGICAS E AMBIENTAIS PARA O USO DE MINERAIS DE POTÁSSIO NA ROCHAGEM

O uso de minerais de potássio na rochagem, dentre eles, flogopita, envolve um conjunto complexo de implicações, que vão desde o rigor do cumprimento de normas legais até o desenvolvimento de novas tecnologias de processamento e a mitigação de impactos ambientais globais.

4.1 IMPLICAÇÕES REGULATÓRIAS

No Brasil, a rochagem foi formalmente institucionalizada pela Lei 12.890/2013, que introduziu os remineralizadores como uma categoria de insumo agrícola. As especificações técnicas foram consolidadas pela Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento-MAPA (BRASIL, 2016), que estabelece critérios rígidos como:

- Composição: a soma de bases (CaO, MgO e K_2O) deve ser ≥ 9% e o teor de K_2O deve ser ≥1%.
- Limites de Sílica: o teor de sílica livre (quartzo) é limitado a 25%.
- Toxidade: são estabelecidos limites máximos para Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), como As, Cd, Cr, Hg e Pb, para evitar a contaminação do solo e da cadeia alimentar.
- Necessidade de Registro: para ser comercializado, o produto exige testes de eficiência agronômica realizados em casas de vegetação ou em campo.

4.2 IMPLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

A eficácia da aplicação econômica e tecnológica da aplicação de flogopititos como remineralizadores, para ser aplicado na rochagem depende diretamente da forma como a rocha é processada e aplicada, devendo levar em consideração aspectos como:

- Tamanho da partícula: as partículas de pó de rocha devem ser reduzidas aos níveis de silte e argila, aumentando a superfície específica e a velocidade de liberação de potássio (SWOBODA, 2022; BENEVIRDES FILHO et al., 2023).
- Modificações para Eficiência: pesquisas indicam que a acidulação de micas, pode aumentar a solubilidade de minerais potássicos insolúveis (SWOBODA, 2022).
- Bioativação: a combinação de pó de rocha com matéria orgânica gerada a partir de compostagem, ou ainda a inoculação com bactérias solubilizadoras de silicatos, acelera o intemperismo mineral através da ação de ácidos orgânicos e respiração microbiana (SWOBODA, 2022; BENEVIRDES FILHO et al., 2023; THEODORO et al., 2026).

4.3 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE

A rochagem possui largo potencial para sequestro de CO_2, a partir do intemperismo acelerado de silicatos (ERW), convertendo-o em bicarbonatos estáveis, que são lixiviados para os oceanos ou

formam carbonatos pedogênicos (SWOBODA, 2022; THEODORO et al., 2026).) Segundo esses autores, a sinergia com matéria orgânica pode triplicar essa eficiência de captura.

Benevirdes Filho et al. (2023) ressaltam que remineralizadores silicáticos podem reduzir custos agrícolas e contribuir para sustentabilidade da produção em regiões tropicais. Ao contrário dos fertilizantes solúveis, os remineralizadores corrigem a acidez, aumentando o pH do solo, elevam a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e fornecem micronutrientes diversos, combatendo a "erosão nutricional" das culturas, melhorando assim a saúde do solo (BENEVIRDES FILHO et al., 2023; THEODORO et al., 2026). Por liberarem nutrientes de forma gradual, e produzir um efeito residual por até 5 anos, os minerais de potássio reduzem o risco de eutrofização de águas, e apresentam melhor desenvolvimento radicular, maiores níveis de umidade do solo, maior massa verde nas plantas e maior perfilhamento (BENEVIRDES FILHO et al., 2023).

5 CONCLUSÃO

A potassificação representa importante processo geoquímico associado à formação de rochas silicáticas com potencial uso agrícola. O enriquecimento em minerais potássicos promove aumento do potencial remineralizador, especialmente em regiões tropicais de elevada deficiência nutricional. Flogopititos destacam-se como fontes alternativas de potássio para nutrição de plantas. Entretanto, a eficiência da aplicação desse material depende de fatores tecnológicos e ambientais que devem ser avaliados de forma integrada. O tamanho da partícula é um aspecto que necessita atenção, pois a redução granulométrica aumenta a área superficial específica e favorece ao intemperismo mineral. Porém, a moagem excessiva pode elevar significativamente os custos energéticos, além do risco a saúde através da inalação de poeira mineral durante preparação e aplicação do pó de rocha.

Além da relevância agronômica, a utilização de rochas potassificadas na rochagem pode contribuir para sustentabilidade ambiental, valorização de resíduos minerais, fortalecer a economia circular e reduzir a dependência brasileira de importações de fertilizantes químicos do mercado internacional. Esses produtos podem fortalecer a agricultura brasileira, trabalhando em prol da segurança alimentar e da soberania nacional.

REFERÊNCIAS

BENEVIRDES FILHO, P. R. R. et al. (2023) Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region). Minerals, v. 13, n. 10, p. 1255–1255.

BRASIL (2016). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento-MAPA. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 49, p. 10.

BROD, J. A.; GASPAR, J. C.; ARAÚJO, D. P.; GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; JUNQUEIRA-BROD, T. C. (2001) Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics. Journal of Asian Earth Sciences, v. 19, p. 265–296.

CARDOSO, V. M. et al.(2025) Geopolítica Global dos Fertilizantes: Impactos sobre o agronegócio brasileiro. Comércio Internacional: Insper Agro Global. Disponível em: https://agro.insper.edu.br/storage/papers/November2025/2025.11.25%20IAG%20WP%20Geopol%C3%ADtica%20dos%20Fertilizantes.pdf. Acesso em: 14 maio. 2026.

CODILLO, E. A.; et al. (2022) Fluid-mediated mass transfer between mafic and ultramafic rocks in subduction zones. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 23.

CORRIVEAU, L.; MONTREUIL, J.-F. (2025) Metasomatic Mineral Systems with IOA, IOCG, and Affiliated Critical and Precious Metal Deposits: A Review from a Field Geology Perspective. Minerals, v. 15, 365. https://doi.org/10.3390/min15040365

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. (2013) Rock-forming Minerals: Sheet Silicates. 2. ed. London: Geological Society. v. 3C.

EVANS, K. A.; TOMKINS, A. G. (2020) Metamorphic fluids in orogenic settings. Elements, v. 16, n. 6, p. 381–387.

FEDO, C. M., NESBITT, H. W, YOUNG, G. M. (1995); Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology; 23 (10): 921–924. doi: https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2

FETTES, D., DESMONS, J. (ed.). (2007). Metamorphic rocks: a classification and glossary of terms. Cambridge: Cambridge University Press, 244 p.

HOERLLE, G.S, (2021). Metassomatismo polifásico em rochas carbonáticas: evolução e metagênese dos escarnitos associados a intrusão do complexo granítico Caçapava do Sul (RS, Brasil). Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, UFRGS.

PEREIRA, A. C. (2025). Potassium recovery from phlogopite micas: mechanisms, agronomic potential, and research gaps – a review. Recima21, Journal Article. https://doi.org/10.47820/recima21.v6i12.7091

PEREIRA, A. C.; GOMES, M. R. S. (2021) Biotita e flogopita como fonte alternativa de potássio para fertilizante: extração hidrometalúrgica. Geociências, v. 40, n. 3, p. 781–786.

PIRAJNO, F. (2009) Hydrothermal Processes and Wall Rock Alteration. In: Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Dordrecht: Springer. p. 73–164. DOI: 10.1007/978-1-4020-8613-7_2.

PIRAJNO, F. (2014) Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock: Effects of Metasomatism on Mineral Systems and Their Host Rocks. In: Hedenquist, J. W. (ed.). Treatise on Geochemistry (2nd ed.). Elsevier.

SAFONOV, O., BUTVINA, V., & LIMANOV, E. (2019). Phlogopite-Forming Reactions as Indicators of Metasomatism in the Lithospheric Mantle. Minerals, 9(11), 685. https://doi.org/10.3390/min9110685

SILVA, A. A. S. et al. (2010) Flogopitito da Bahia como fonte de potássio para a agricultura brasileira. In: SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, 2. Campina Grande, PB. Campina Grande: CETEM/UFPE, p. 115-123.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. (2022) Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. Science of The Total Environment, v. 807, p. 150976.

THEODORO, S. H. et al. (2026) Rock Dusts: A Silent Revolution for Soil Nutrition and Climate Protection. Sustainability, v. 18, n. 10, p. 4687.

WANG, L., SUI, X., He, M., YANG, M., & PENG, B. (2024). Geochemistry and Mineralogy of Phlogopite and Its Implications for Serpentinization of Jian Forsterite Jade in Southern Jilin Province, China. Minerals 2024, 14, 1087. https://doi.org/10.3390/ min14111087

ZARNI, M. J., SANTOS, H. G., (2021). Formação do solo Tropical, Embrapa Solos, AGEITEC. Disponível em: https://www.embrapa.br/web/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais. Acesso em: 01/06/2026.