

PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL AGROGEOLÓGICO DE ROCHAS SEDIMENTARES E VULCÂNICAS DO ALTO PARANAÍBA, MINAS GERAIS

Francisco Augusto dos Santos **Ribeiro**¹, Lucas Vieira Carvalho **Souza**², Alexandre **Uhlein**³,
Débora Silvano **Moreira**⁴

(1 – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), franciscoribeiro12309@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0345-486X>; 2 – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), lucasvieirasouza355@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4291-8698>; 3 – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC), auhlein@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0768-608X>; 4 – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC), deborasm@ufmg.br, <https://orcid.org/0000-0002-8282-8340>)

Resumo: Este artigo apresenta a caracterização petrográfica e litoquímica de três unidades litológicas do Alto Paranaíba, estado de Minas Gerais: siltitos e arenitos verdes da Formação Serra da Saudade (Grupo Bambuí), as rochas ultrabásicas da Formação Patos, arenitos e conglomerados da Formação Capacete (Grupo Mata da Corda). Através de dados de petrografia microscópica, difração de raios X e fluorescência de raios X, avaliamos seu potencial para uso como fertilizante ou remineralizador. As rochas areno-pelíticas verdes apresentam mineralogia dominada por quartzo, glauconita, illita, caulinita e muscovita, com teores expressivos de sílica livre (40–55%), o que ultrapassa o limite máximo permitido pela Instrução Normativa MAPA nº 5/2016. As rochas ultrabásicas da Formação Patos apresentam assembleia mineral composta por diopsídio, perovskita, flogopita, sanidina, apatita, óxidos e argilominerais secundários, além de baixos teores de sílica livre e elevados conteúdos de K, Ca, Mg e P, atendendo simultaneamente aos critérios legais para registro como remineralizador e configurando-se como o material mais promissor do estudo. As rochas da Formação Capacete, embora quimicamente enriquecidas em macronutrientes, exibem elevado teor de quartzo (~40%), o que pode inviabilizar seu uso como remineralizador.

Palavras-chave: Agromineral; Fertilizante Mineral; Remineralizador; Potássio; Fósforo.

PETROGRAPHY, GEOCHEMISTRY, AND PRELIMINARY ASSESSMENT OF AGROGEOLOGICAL POTENTIAL OF SEDIMENTARY AND VOLCANIC ROCKS FROM ALTO PARANAÍBA, MINAS GERAIS

Abstract: This presents the petrographic and lithochemical characterization of three lithological units from the Alto Paranaíba region, Minas Gerais state, Brazil: green siltstones and sandstones of the Serra da Saudade Formation (BambuÍ Group), ultrabasic rocks of the Patos Formation, sandstones, and conglomerates of the Capacete Formation (Mata da Corda Group). Through microscopic petrography, X-ray diffraction, and X-ray fluorescence data, we evaluate their potential for use as fertilizer or remineralizer. The green psammo–pelitic rocks display mineralogy dominated by quartz, glauconite, illite, kaolinite, and muscovite, with significant contents of free silica (40–55%), exceeding the maximum limit permitted by MAPA Normative Instruction No. 5/2016. The ultrabasic rocks of the Patos Formation show a mineral assemblage composed of diopside, perovskite, phlogopite, sanidine, apatite, oxides, and secondary clay minerals, as well as low free silica contents and high K, Ca, Mg, and P concentrations. These characteristics simultaneously comply with the legal requirements for registration as soil remineralizer, making them the most promising material in this study. The rocks of the Capacete Formation, although chemically enriched in macronutrients, exhibit a high quartz content (~40%), rendering its use as a remineralizer unfeasible.

Keywords: Agromineral; Mineral Fertilizer; Remineralizer; Potassium; Phosphorus.

PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL AGROGEOLÓGICO DE ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS DEL ALTO PARANAÍBA, MINAS GERAIS

Resumen: Este artículo describe la caraterización petrográfica y litoquímica de tres unidades litológicas de la región del Alto Paranaíba, estado de Minas Gerais: limolitas y areniscas verdes de la Formación Serra da Saudade (Grupo Bambuí), rocas ultrabásicas de la Formación Patos, y areniscas y conglomerados de la Formación Capacete (Grupo Mata da Corda). Mediante petrografía microscópica, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X, se evalúa su potencial

como fertilizante o remineralizador. Las rocas areno-pelíticas verdes presentan una mineralogía dominada por cuarzo, glauconita, illita, caolinita y moscovita, con contenidos significativos de sílice libre (40–55 %), que superan el límite máximo permitido por la Instrucción Normativa MAPA n.º 5/2016. Las rocas ultrabásicas de la Formación Patos muestran una asociación mineral compuesta por diopsido, perovskita, flogopita, sanidina, apatita, óxidos y minerales arcillosos secundarios, además de bajos contenidos de sílice libre y elevadas concentraciones de K, Ca, Mg y P, cumpliendo simultáneamente los criterios legales para su registro como remineralizador y configurándose como el material más prometedor del estudio. Las rocas de la Formación Capacete, aunque químicamente enriquecidas en macronutrientes, exhiben un alto contenido de cuarzo (~40 %), lo que puede inviabilizar su uso como remineralizador.

Palabras-clave: Agromineral; Fertilizante Mineral; Remineralizador; Potasio; Fósforo.

Introdução

O uso de agrominerais tem se destacado nas últimas décadas como alternativa aos fertilizantes convencionais. Esses materiais podem fornecer nutrientes essenciais às plantas e atuar como condicionadores de solo, favorecendo práticas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis (Martins et al., 2010; 2024). Os agrominerais são definidos como insumos de origem geológica aplicados diretamente ao solo e incluem rochas moídas ou produtos de alteração natural que liberam nutrientes gradualmente (Decreto nº 8.384/2014). Além da liberação lenta de nutrientes, menor impacto ambiental e disponibilidade regional (Martins et al., 2010; Pereira et al., 2019; Theodoro & Leonardos, 2006), possuem potencial para captura de carbono devido à formação de carbonatos estáveis durante o processo de intemperismo acelerado (Manning, 2021; Medeiros et al., 2025; Silva et al., 2025a) e maior eficiência quando combinados a outros fertilizantes (Souza et al., 2023).

No Brasil, a regulamentação e o registro desses insumos são estabelecidos pela Lei nº 6.894 (1980), decretos e instruções normativas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Além disso, o Plano Nacional de Fertilizantes – Horizonte 2050 (Brasil, 2021) destaca a importância do aproveitamento de fontes minerais nacionais como estratégia para reduzir a dependência externa e fortalecer a segurança alimentar. A Instrução Normativa do MAPA nº 5 (2016) estabelece que os remineralizadores devem conter macronutrientes em teores

capazes de contribuir para a nutrição vegetal, pelo menos 1% de K_2O e soma de bases ($K_2O + CaO + MgO$) igual ou superior a 9% em peso. A normativa também limita a presença de sílica livre a no máximo 25%, referente à proporção de quartzo no material, mineral inerte, de baixa reatividade nos solos, que pouco contribui para a eficiência agronômica (Instrução Normativa nº 5, 2016).

Na região do Alto Paranaíba, Minas Gerais (Figura 1), uma das áreas mais ricas do agronegócio nacional, ocorrem rochas areno-pelíticas, silto-arenosas e pelíticas de cor verde, popularmente chamadas de “verdetes” (Costa Júnior et al., 2024; Lima et al., 2007) e siltitos glauconíticos, da Formação Serra da Saudade, Grupo Bambuí (Cambriano/Neoproterozoico), estas com quantidades significativas de glauconita que resultam em maiores concentrações de potássio (Dasi et al., 2024; Duarte et al., 2022; Moreira et al., 2020; Schimicoscki et al., 2025; Souza et al., 2023). Outro destaque são os kamafugitos da Formação Patos, Grupo Mata da Corda (Cretáceo Superior), rochas vulcânicas máficas a ultramáficas alcalinas, compostas de minerais como perovskita, flogopita, apatita e pseudoleucita, fonte de potássio, magnésio, cálcio e fósforo, macronutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal (Costa et al., 2023; Martins et al., 2008; Martins et al., 2010; Migliavaca et al., 2022; Silva et al., 2025a,b). Por fim, a Formação Capacete, também do Grupo Mata da Corda, composta principalmente por tufos, lapilitos, tufitos e arenitos cineríticos, derivados de brechas piroclásticas, fluxos e retrabalhamento sedimentar, representa depósitos sedimentares associados ao magmatismo alcalino do Grupo Mata da Corda (Sgarbi et al., 2000; 2004). Esses materiais, após moagem, tamisação e eventuais tratamentos de solubilização química, podem atender às normas estabelecidas pelo MAPA para registro e uso agrícola (Brasil, 2018).

Neste artigo busca-se integrar dados geológicos, mineralógicos e geoquímicos para uma avaliação preliminar da viabilidade de rochas sedimentares e vulcânicas da região do Alto Paranaíba como fertilizantes e remineralizadores, com base em critérios mineralógicos e químicos obtidos por meio de análises de petrografia, difração de raios X e fluorescência de raios X.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido a partir da caracterização petrográfica, mineralógica e geoquímica de amostras dos principais litotipos da Formação Serra da Saudade, Grupo Bambuí,

e das formações Patos e Capacete, Grupo Mata da Corda, obtidas em um levantamento em escala regional (Figura 1 e Tabela 1). A confecção de lâminas petrográficas, análises por microscopia óptica de luz transmitida e por difração de raios-X foram realizadas nos laboratórios do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Figura 1: A) Localização da área de pesquisa no contexto da Bacia do São Francisco (Reis, 2011a). B) Localização da área no estado de Minas Gerais. C) Mapa geológico simplificado, com as unidades geológicas e pontos de amostragem (Dias et al., 2011; Fragoso et al., 2011; Reis, 2011b; Uhlein et al., 2011).

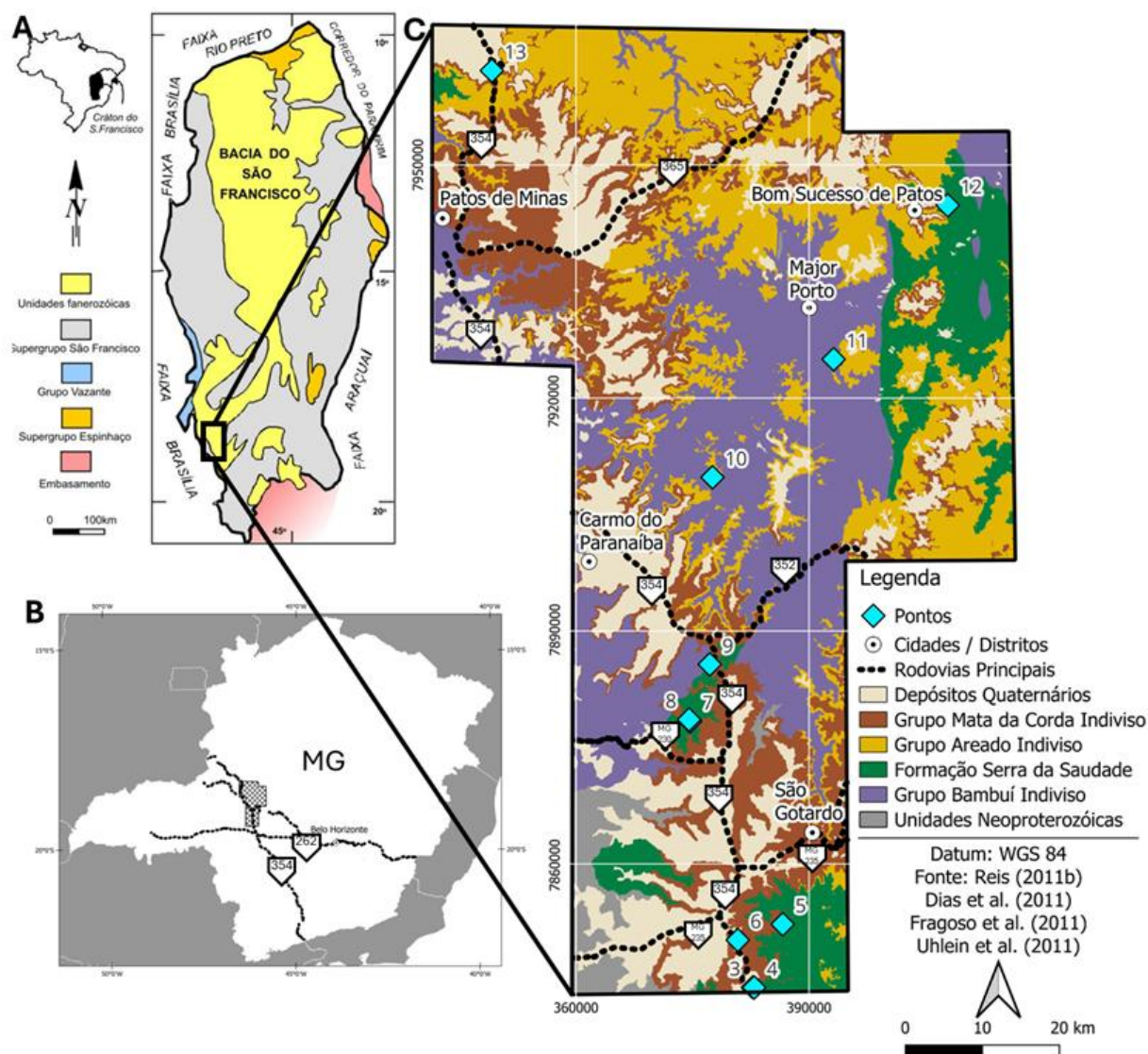


Tabela 1: Localização das amostras e análises realizadas: difração de raios X (DRX), petrografia por lâminas delgadas em microscópio óptico de luz transmitida e fluorescência de raios X (FRX). Coordenadas em UTM datum WGS 1984, Zona 23 S.

Amostra	Coordenada E	Coordenada S	Altitude (m)	Litotipo	Análises		
					DRX	Petrografia	FRX
P2	400.752	7.816.667	1111	Siltito esverdeado	X	X	X
P3	388.180	7.840.344	1132	Arenito esverdeado	-	X	X
P7	382.709	7.873.103	957	Arenito esverdeado	X	X	-
P9	384.247	7.880.181	1063	Conglomerado com clastos de vulcânica ultrabásica	-	X	X
P10	384.420	7.896.121	953	Rocha vulcânica ultrabásica	X	X	X
P11	392.702	7.905.957	856	Siltito esverdeado	X	-	X
P13	339.699	7.927.428	982	Rocha vulcânica ultrabásica e rocha piroclástica	X	X	X

A difração de raios X foi feita pelo método do pó. As amostras foram pulverizadas em gral de ágata, homogeneizadas e quarteadas, com a retirada de uma alíquota, peneirada em malha de nylon com abertura #200, sendo o material passante, com granulometria inferior a 74 μm , acondicionado em porta-amostras de alumínio, por montagem do tipo *back-loading*. A análise foi feita no difratômetro de raios X Panalytical Expert PRO, equipado com goniômetro θ – θ (theta–theta) de 240 mm de diâmetro e geometria Bragg–Brentano. No tubo de raios X, o filamento de tungstênio foi excitado sob corrente de 45 mA e tensão de 40 kV, promovendo o bombardeamento de um alvo de cobre ($\text{CuK}\alpha_1 = 1,54060 \text{ \AA}$). Um conjunto de fendas e aberturas fixas foi empregado para a colimação e controle da área de incidência sobre o porta-amostra. As varreduras foram realizadas em modo contínuo, no intervalo de 5 – $70^\circ 2\theta$, com passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 1 s por passo, totalizando 3.250 pontos de aquisição e duração média de 54 min 13 s por amostra. O detector utilizado foi do tipo proporcional, constituído por câmara cilíndrica preenchida com mistura de xenônio e metano, e janela de berílio com dimensões de $20 \times 24 \text{ mm}$. Os difratogramas obtidos foram processados e interpretados no software HighScore Plus. As posições e intensidades dos principais picos foram comparadas às fases registradas nos bancos de dados COD (*Crystallography Open Database*) e/ou ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). A interpretação dos dados considerou critérios como o contexto geológico das amostras.

A composição química das amostras foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) no laboratório SGS Geosol Ltda (código XRF79C). As amostras foram preparadas conforme protocolo padrão, envolvendo secagem a 105 °C, britagem a 3 mm, homogeneização, quarteamento e pulverização de 250 a 300 g de amostra em moinho de aço até 95% de material passante em 150 mesh, com a separação de alíquotas de 10g para análise. Conforme procedimento de controle de qualidade do laboratório, a cada 20 amostras são realizados ensaios granulométricos, nos quais o critério de aceitação é atingir 95% de amostra passante em peneira de 150 mesh. A perda ao fogo (LOI) foi obtida por calcinação a 1000 °C, permitindo avaliar o teor de voláteis e o grau de alteração das rochas. Uma alíquota de 0,5 g de amostra foi fundida com tetraborato de lítio para obtenção de uma pastilha estável e livre de efeitos de matriz. Após a fusão as pastilhas formadas foram encaminhadas para leitura em espectrômetro de raios X utilizando curva de calibração preparada com matriz de rochas silicáticas. Os óxidos analisados e seus respectivos limites de detecção estão apresentados na Tabela 2, fornecida pelo laboratório. O laboratório adota um procedimento de controle de qualidade que inclui a inserção de materiais de referência certificados, duplicatas e brancos para determinar exatidão, precisão e contaminação, em conformidade com normas ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004. No lote analisado, que compreendeu um total de 17 amostras, foi incluído pelo laboratório um branco de preparação, uma duplicata e um material de referência certificado (Tabela 3).

Tabela 2: Óxidos analisados e limites percentuais de detecção inferior (LDI) e superior (LDS) do método de fluorescência de raios X (código XRF79C). Fe₂O_{3t} = ferro total, LOI = perda ao fogo por calcinação.

Analito	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI
LDI (%)	0,10	0,01	0,10	0,01	0,01	0,10	0,10	0,01	0,01	0,01	0,10
LDS (%)	99,00	100,00	100,00	100,00	70,00	100,00	12,00	18,00	75,00	45,00	100,00

Fonte: SGS Geosol Laboratórios Ltda (2025a)

Tabela 3: Resultados de controle de qualidade reportados pelo laboratório. Fe_2O_{3t} = ferro total, LOI = perda ao fogo por calcinação; n.a = não analisado.

Tipo	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O _{3t} %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	MnO %	P ₂ O ₅ %	LOI %
Branco	>99,00	<0,01	<0,10	0,80	<0,01	<0,10	<0,10	<0,01	0,02	0,01	0,01
Amostra	65,50	0,85	14,50	5,61	0,13	2,54	<0,10	8,59	0,04	0,06	3,20
Duplicata	63,80	0,82	14,2	5,37	0,12	2,51	0,10	8,40	0,04	0,06	3,36
Padrão (SG-142)	59,70	0,88	11,10	13,40	3,34	1,81	0,70	2,29	0,28	0,37	n.a
Padrão (SG-24)	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	11,81

Fonte: SGS Geosol Laboratórios Ltda (2025b)

O estudo limita-se a uma caracterização petrográfica e geoquímica preliminar, voltada à avaliação dos teores totais de macro e micronutrientes. Não foram realizadas análises de teores solúveis, conforme o Manual de Métodos Analíticos Oficiais de Fertilizantes, Corretivos, Substratos, Condicionadores e Remineralizadores de Solo (Brasil, 2024), tampouco a determinação de elementos potencialmente tóxicos. Também não foram objeto deste estudo a avaliação da granulometria do produto final, nem a realização de ensaios agronômicos, seja de incubação ou com plantas, em condições controladas e/ou de campo.

Resultados e Discussão

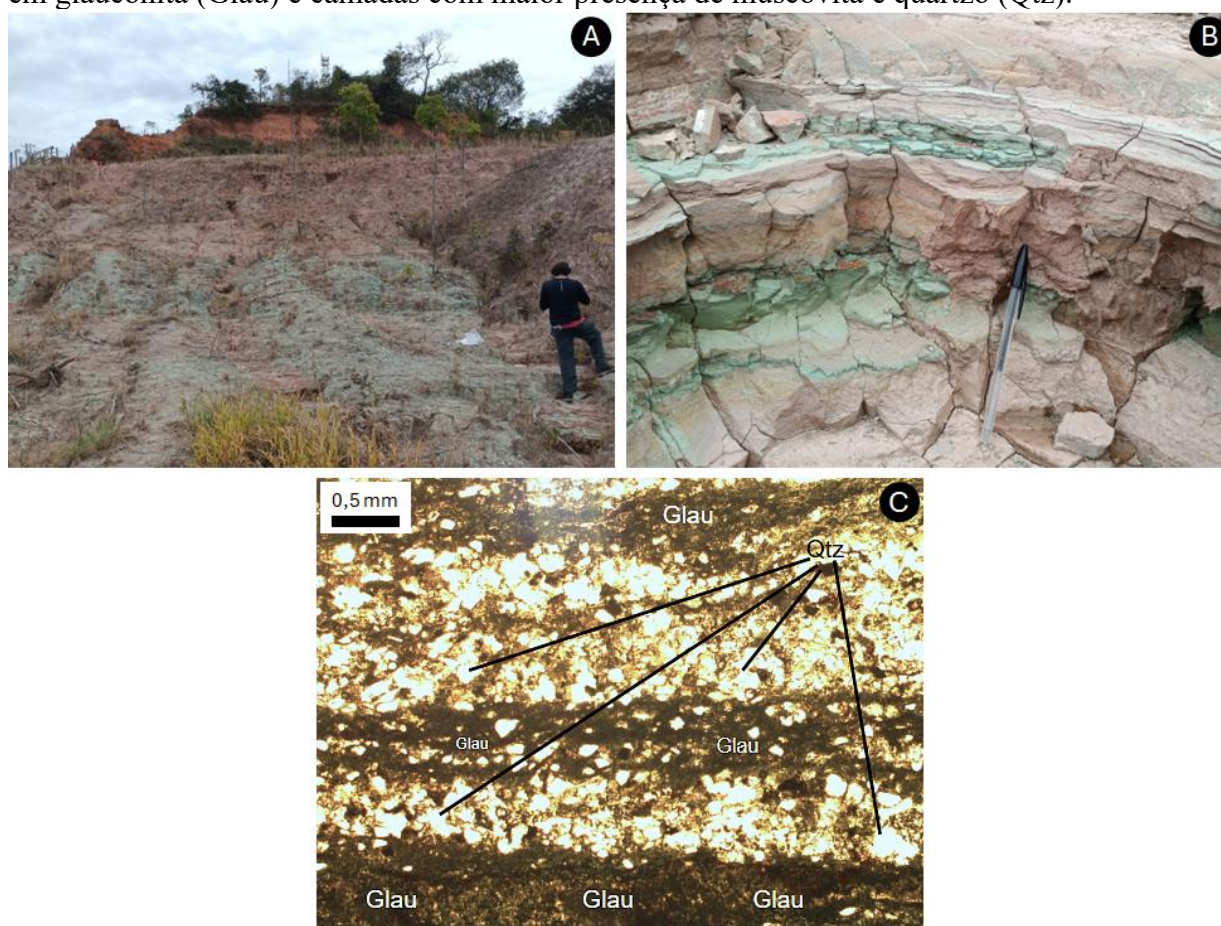
Análise petrográfica

As rochas da Formação Serra da Saudade apresentam coloração variando de creme a castanho-claro ou esverdeado, granulometria fina e aspecto homogêneo, predominando siltitos e grauvas arcoseanas (Figura 2A, B).

As rochas silto-arenosas apresentam abundância de grãos de quartzo angulosos a subarredondados, moderadamente selecionados, com intercrescimentos sutis, sugerindo compactação e diagênese incipiente. A matriz é composta de grãos muito finos, de composição heterogênea. O cimento é composto por argilominerais hipocristalinos como a glauconita, e junto com a matriz, compõe cerca de 40% da rocha. A estrutura é marcada por laminações subparalelas

bem definidas: camadas castanho-esverdeadas, mais espessas, ricas em quartzo (50-55% da rocha) e muscovita (5-10%), alternadas com camadas esverdeadas finas dominadas por glauconita e menor teor de quartzo. Assim, os clastos correspondem aproximadamente a 60% da rocha (Figura 2C).

Figura 2: A. Afloramento de siltito verde da Formação Serra da Saudade, Grupo Bambuí. B. Siltito verde com estratificação formada pela intercalação de camadas esverdeadas e amarronzadas. C. Fotomicrografia sob nicóis paralelos mostrando a intercalação de lâminas ricas em glauconita (Glau) e camadas com maior presença de muscovita e quartzo (Qtz).



No arenito (Figura 3), os grãos são subarredondados a subangulosos, bem selecionados e de tamanho areia fina a média, dispostos em uma matriz formada por grãos mais finos, com variações para tons acinzentados e castanho-escuros. A matriz ocupa 35-40% da rocha, sem evidências de cimento. O quartzo ocorre em cerca de 35-40% da amostra. Observa-se a presença de plagioclásio (5-10% da rocha), além de cristais de muscovita (5-10%) bem preservados.

Também ocorrem grãos de feldspato potássico (1-5%), associados a crescimento secundário de quartzo, indicando leve recrystalização. Não há orientação preferencial dos grãos na matriz. Nota-se ainda a presença de fragmentos líticos de arenito, diferenciando-se por sua coloração e granulação mais fina, sugerindo compactação moderada. A rocha é classificada como uma grauvaça feldspática (Pettijohn et al., 1987). A associação mineral identificada por DRX (Figura 4), consiste em glauconita, illita, caulinita e muscovita herdada, reforça um contexto de diagênese incipiente.

Figura 3: A. Afloramento de arenito da Formação Serra da Saudade, Grupo Bambuí, com estratificação plano-paralela. B. Contato entre arenito mais esverdeado (topo) com arenito avermelhado (base). C. Fotomicrografia mostrando fragmento lítico de arenito delimitado por grãos mais finos de quartzo. D. Fotomicrografia mostrando grãos de quartzo angulosos e mal selecionados dispostos em matriz argilosa.

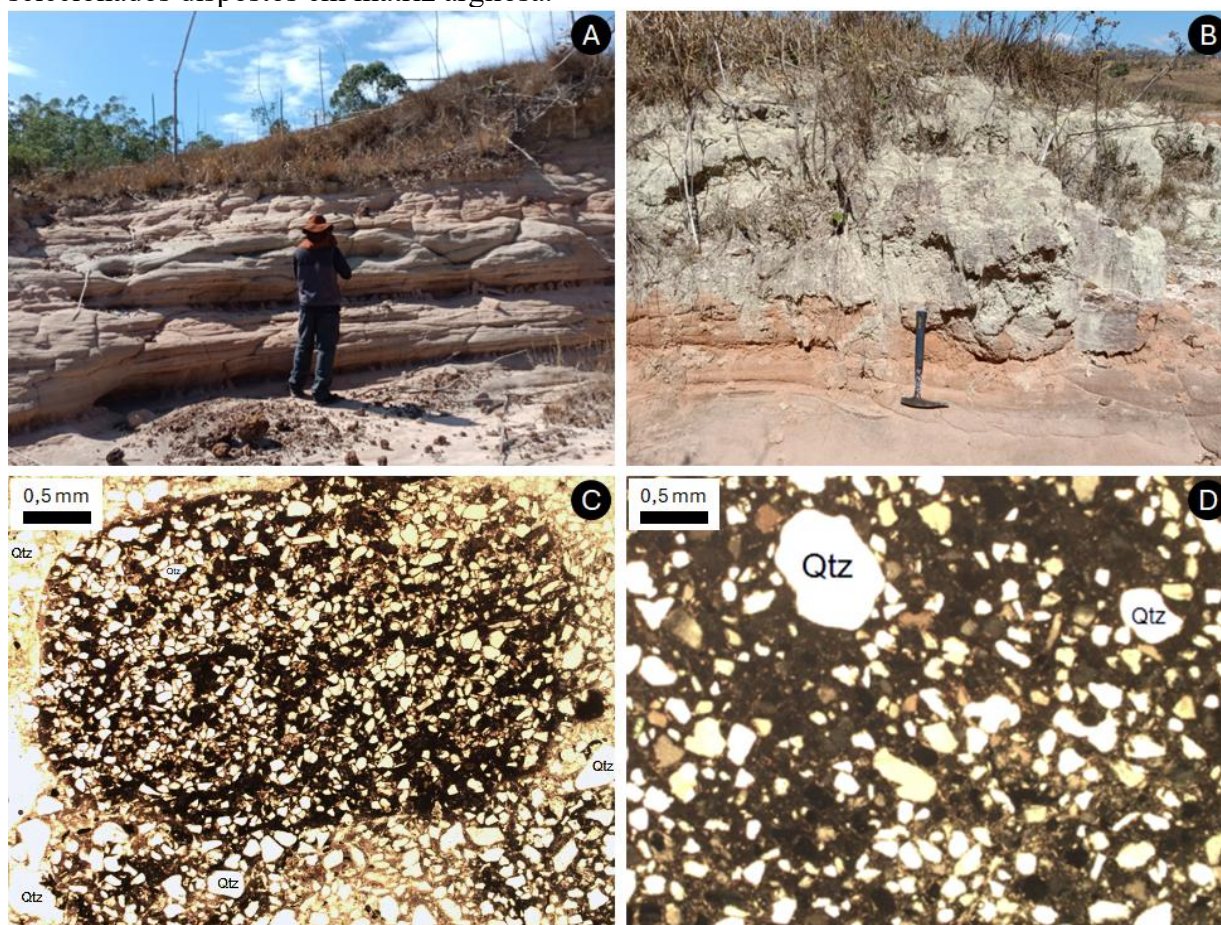
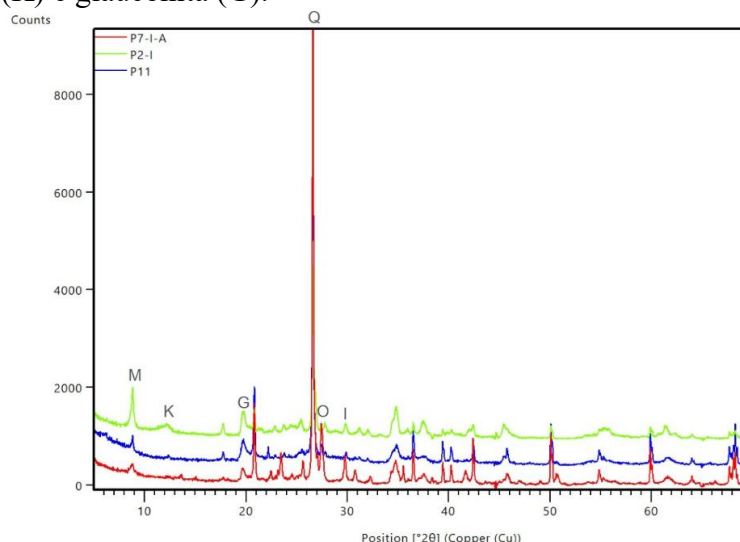
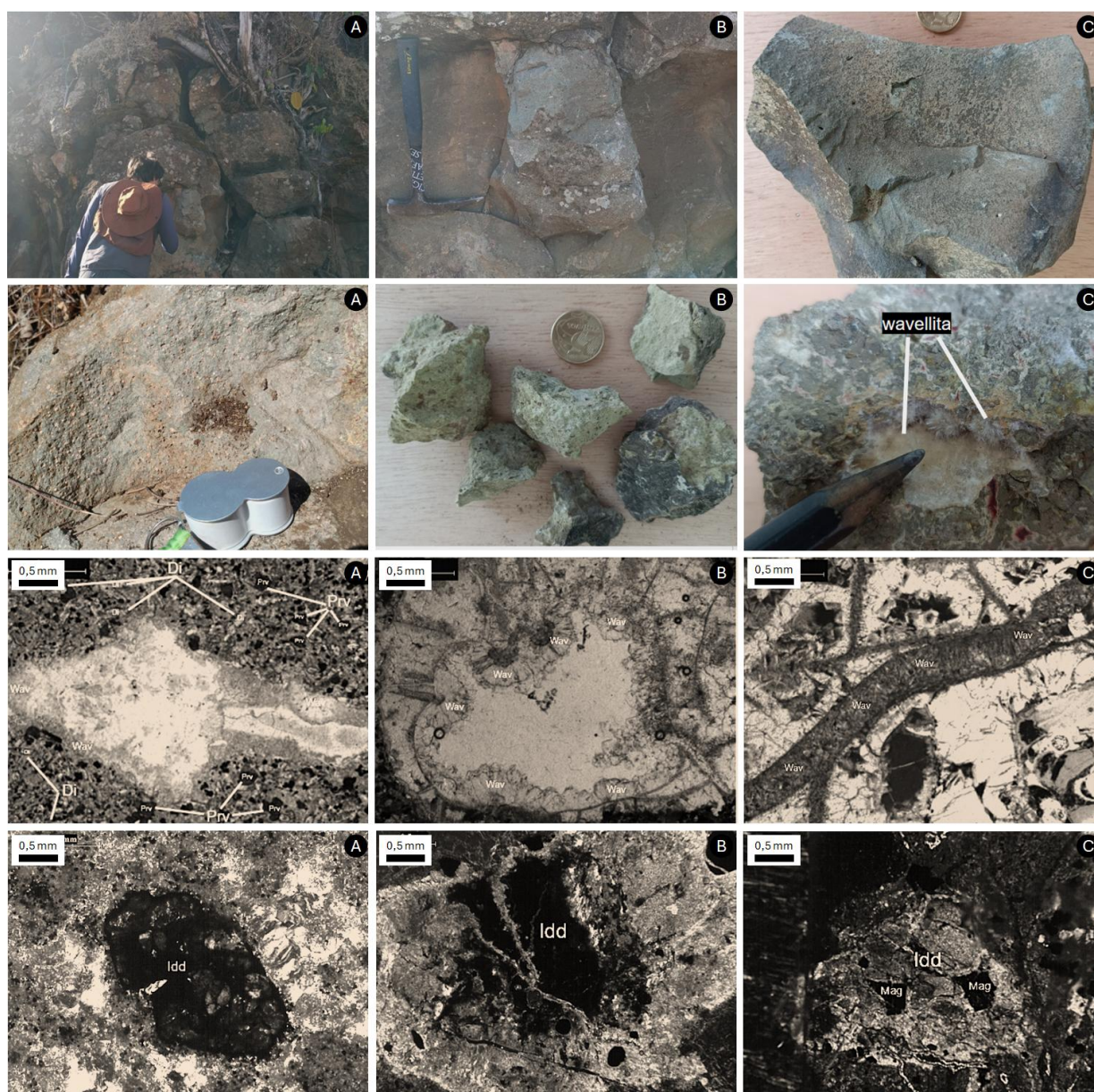


Figura 4: Difratograma de raios X das rochas da Formação Serra da Saudade (Grupo Bambuí). Observam-se picos de difração característicos de quartzo (Q), ortoclásio (O), muscovita (M), illita (I), caulinita (K) e glauconita (G).



A rocha vulcânica ultrabásica da Formação Patos, Grupo Mata da Corda, possui cor cinza esverdeado a castanho, dependendo do grau de alteração (Figura 5 A-E). A matriz é predominantemente afanítica, com fenocristais milimétricos de clinopiroxênio, olivina e iddingsita. Em alguns pontos há a presença de amígdalas, preenchidas por wavellita (5-15%) (Figura 5F-H). Há também cristais esbranquiçados de sanidina em amostras pouco coesas e mais alteradas. A textura é porfírica a glomeroporfírica. A matriz, que corresponde a 30-50% da rocha, varia de microcristalina a hipocristalina, com porções parcialmente devitrificadas de coloração esverdeada a castanha. Os fenocristais que se destacam são de diopsídio (5-25%), frequentemente corroído, perovskita (5-15%) e minerais opacos (5-20%), de formas irregulares, dispersos na matriz. A flogopita (1-5%) apresenta alteração para material de aspecto fibroso intersticial. A iddingsita (5-15%) indica intensa ação intempérica e alteração hidrotermal tardia (Figura 5I).

Figura 5: A. Afloramento de rocha vulcânica ultrabásica da Formação Patos, Grupo Mata da Corda. B, C, D e E. Detalhes de afloramentos e respectivas amostras. F. Amostra com vesículas preenchidas por wavellita. G e H. Fotomicrografias mostrando a matriz formada por diopsídio (Di) de coloração mais esbranquiçada, minerais opacos e perovskita (Prv), de coloração amarronzada mais escura. e vesículas preenchidas por wavellita (Wav). I. Fotomicrografia com destaque para veios preenchidos por wavellita (Wav). J, K e L. Fotomicrografias com destaque para cristais subédricos de iddingsita (Idd), corroídos em meio a matriz e com inclusões de magnetita (Mag).

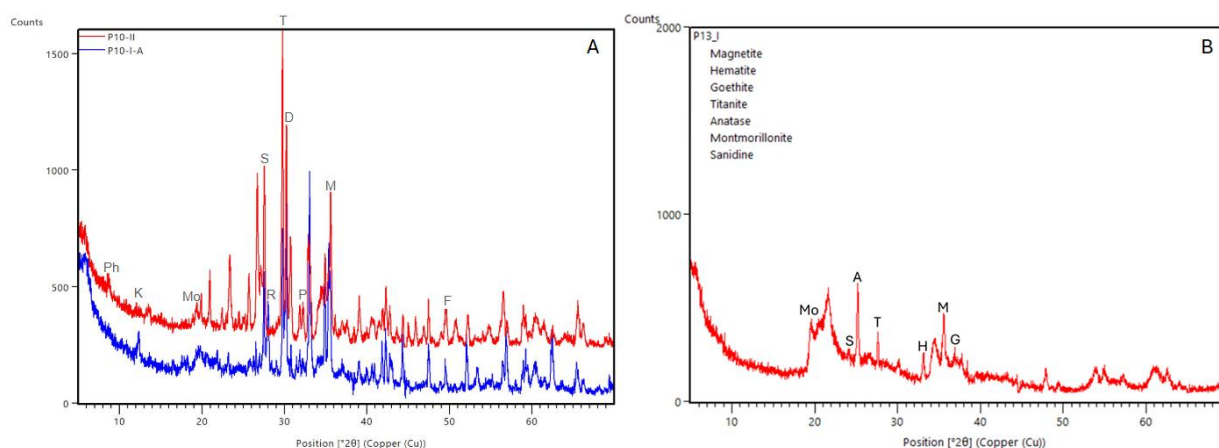


Por DRX (Figura 6A) foi possível identificar perovskita, diopsídio, richterita, sanidina, magnetita, flogopita e fluorapatita como fases primárias. A detecção de apatita e da wavellita

confirma múltiplas fases fosfatadas, com implicações diretas para o potencial de liberação de fósforo. Os argilominerais observados em lâmina aparecem no DRX como montmorilonita e caulinita, evidenciando alteração hidrotermal progressiva e intemperismo supergênico posterior (Weaver, 1989). A presença de anatásio, titanita e óxidos de ferro (hematita e goethita) reforça o grau avançado de alteração e a mobilização de Fe e Ti. Os minerais perovskita, diopsídio, richterita e flogopita indicam cristalização a partir de magmas alcalinos ricos em potássio e cálcio.

O padrão de difração das rochas piroclásticas da Formação Patos (Figura 6B) mostra predominância de óxidos (magnetita, hematita, goethita, anatásio) e titanita, além de fases secundárias como montmorilonita. A ocorrência expressiva de argilominerais e óxidos reflete a intensa atuação de processos pós-vulcânicos, incluindo alteração hidrotermal inicial e posterior intemperismo supergênico.

Figura 6: A. Difratoogramas de raios X das amostras de rocha vulcânica da Formação Patos (Grupo Mata da Corda). B. Difratoograma de raios X de rocha piroclástica da mesma formação. Apenas os picos principais dos minerais identificados foram destacados, sendo eles perovskita (P), diopsídio (D), richterita (R), sanidina (S), magnetita (M), fluorapatita (F), flogopita (Ph), montmorilonita (Mo) e caulinita (K).



Na Formação Capacete (Grupo Mata da Corda) predominam arenitos conglomeráticos com estratificações planas (Figura 7), variando de tons amarelados, castanho-avermelhados e esverdeados. A granulometria varia de areia grossa a grânulos, com material argiloso intersticial.

Ao microscópio, predominam grãos subangulosos a subarredondados de quartzo, feldspato e fragmentos líticos, com matriz fina argilosa e seleção ruim a moderada. O arenito

lítico (Figura 7D) apresenta grãos de quartzo (40%) angulosos, mal selecionados, de tamanho areia fina a média, dispostos em uma matriz argilosa (20%), com cimento argiloso escuro (20%). Esse cimento se manifesta como manchas castanhas escuras que envolvem os grãos e, por vezes, penetram em seu interior, sugerindo processos de corrosão ou dissolução parcial dos cristais e reprecipitação do material alterado. Observam-se também minerais opacos (0-5%) disseminados e cristais de plagioclásio (0-5%). Há também fragmentos líticos variados (10%), crescimento secundário de quartzo e piroxênios (0-5%) alterados. Além disso, os grãos não exibem orientação preferencial.

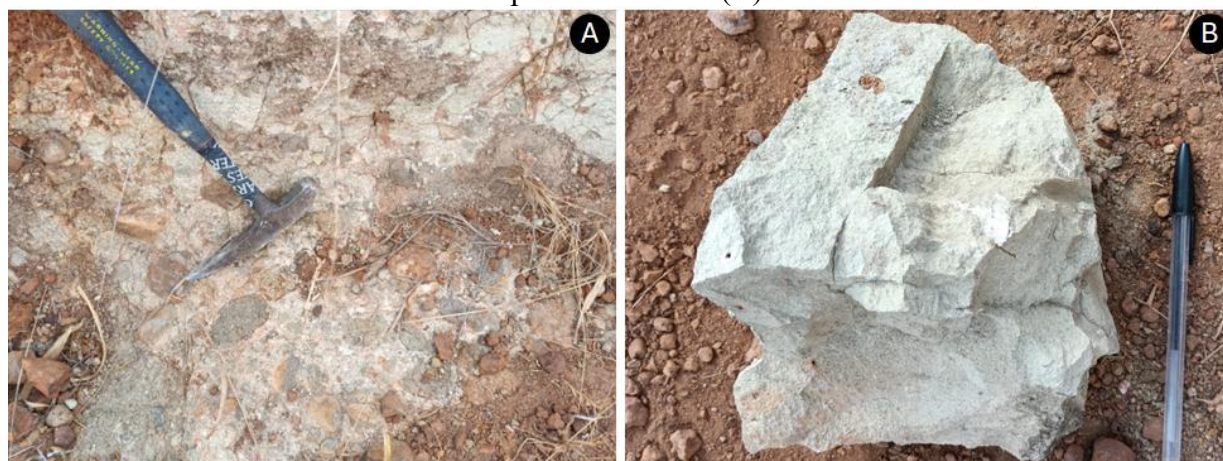
Figura 7: A. Afloramento de arenito da Formação Capacete, Grupo Mata da Corda. B e C - Amostras de arenito esverdeado. D. Fotomicrografia de arenito lítico.



Também ocorre conglomerado (Figura 8), cuja matriz arenosa é constituída por grãos de quartzo (40%) subangulosos, mal selecionados, variando de areia fina a areia média, imersos em

uma matriz argilosa (50%), distribuídos de forma irregular e formando manchas e halos castanho-escuros que envolvem os grãos e, por vezes, penetram em suas bordas. Além disso, ocorrem muscovita (5%) e opacos (5%), sem orientação preferencial, com tamanhos que variam de areia fina a grânulos. A estrutura é predominantemente porosa, embora alguns setores apresentem compactação local e os clastos são de arenitos e rochas vulcânicas ultrabásicas a básicas alteradas. Os clastos são subarredondados e granulometria varia de grânulo a seixo. Em lâmina, é possível observar iddingsita (15%), com bordas corroídas e evidentes feições de alteração intempérica, predominantemente subarredondados e mal selecionados, imersos em uma matriz argilosa (40%) intersticial de coloração esverdeada-escura. O cimento (20%) é argiloso, formando manchas castanhas escuras que recobrem e, por vezes, penetram nos grãos, sugerindo processos de dissolução e recristalização diagenética associados ao intemperismo pós-deposicional. Observa-se presença de minerais opacos (5%) e flogopita (5%) de cor castanha. Há ainda a presença de amígdalas e microvazios na matriz. Essas feições sugerem uma origem ligada a processos de retrabalhamento de materiais vulcânicos básicos, provavelmente derivados de derrames ou tufos da Formação Patos, por erosão e nova sedimentação.

Figura 8: Afloramento de conglomerado da Formação Capacete, Grupo Mata da Corda (A) e respectiva amostra (B).



Análise geoquímica

As análises geoquímicas por fluorescência de raios X (FRX) das amostras da Formação Serra da Saudade (Tabela 2) revelam um predomínio expressivo de sílica, com valores entre 61,01 e 65,06% de SiO₂, compatíveis com rochas siliciclásticas finas ricas em quartzo. Os teores

de Al_2O_3 (14,7–17,3%) e Fe_2O_3 (6,12–6,78%) refletem a presença de argilominerais e minerais que contêm ferro observados microscopicamente e confirmados por DRX, como glauconita, illita e caulinita. Os óxidos alcalinos, de potássio e sódio, exibem valores moderados, com K_2O variando entre 4,21 e 5,12%, evidenciando a contribuição de micas potássicas, como a muscovita, e glauconita, enquanto o Na_2O mantém valores residuais (0,06–0,07%), coerentes com a ausência de plagioclásios sódicos significativos. Os valores dos óxidos de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) são baixos, indicando composição essencialmente terrígena e baixa presença de minerais carbonáticos. O P_2O_5 apresenta valores discretos (0,04–0,09%), refletindo a ausência de fosfatos primários significativos.

As análises geoquímicas das amostras da Formação Patos (Tabela 2) indicam composição típica de rochas vulcânicas ultrabásicas que sofreram alterações, caracterizadas por baixos teores de SiO_2 (29–35%) e enriquecimento significativo em Fe_2O_3 (16–17%), CaO (10–13%), MgO (12%) e TiO_2 (6–7%), compatíveis com a presença de diopsídio, perovskita, richterita, flogopita e magnetita identificados em petrografia microscópica e DRX. Os teores de K_2O (2,2–2,6%) e P_2O_5 (2,3–2,4%) refletem a ocorrência de fases potássicas (flogopita, sanidina) e fosfatadas (apatita e wavellita). A perda ao fogo (6–10%) indica alto teor de minerais hidratados e argilominerais formados durante o intemperismo e alteração hidrotermal, como montmorilonita, caulinita e iddingsita, que contribuem para uma capacidade de troca catiônica (CTC) elevada, favorecendo a liberação lenta de nutrientes (Faroutine, 2018), o que pode ser atribuído à eficiência agrônômica dos kamafigitos (Costa et al., 2023; Martins et al., 2008; Martins et al., 2010; Migliavaca et al., 2022; Silva et al., 2025a,b).

As análises das amostras da Formação Capacete (Tabela 2) evidenciam forte variação composicional ligada à mistura de materiais sedimentares e vulcânicos retrabalhados. A amostra P3 é mais rica em SiO_2 (55,6%), refletindo sua natureza quartzosa, enquanto P9-I apresenta baixo teor de sílica (21,4%) e maior enriquecimento em CaO (21,9%) e MgO (6,1%), sugerindo forte contribuição de clastos de rochas vulcânicas máficas. As amostras exibem Fe_2O_3 e TiO_2 elevados, compatíveis com a presença de minerais opacos e piroxênios alterados, além de teores de K_2O (3–4,5%) associados a micas potássicas. A perda ao fogo é maior em P9-I (17,9%), indicando maior intemperismo e abundância de argilominerais.

Tabela 2: Resultados geoquímicos das amostras analisadas (óxidos - % em peso; LOI = perda ao fogo por calcinação; n.d. = não detectado).

Unidade	Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Total
Siltito e arenito esverdeado da	P2-I	61,01	0,91	17,32	6,78	n.d	2,31	0,07	5,12	0,04	0,03	6,34	99,94
Formação Serra da Saudade,	P2-II	62,09	0,88	17,12	6,12	n.d	2,10	0,07	4,44	0,05	0,05	6,73	99,65
Grupo Bambuí.	P11	65,06	1,02	14,79	6,25	n.d	1,97	0,06	4,21	0,09	0,04	5,63	99,12
Rocha vulcânica ultrabásica da	P10-I-A	35,40	6,47	5,70	16,43	10,50	12,75	1,48	2,18	0,25	2,45	6,17	99,78
Formação Patos, Grupo	P13-II	29,30	6,87	5,34	16,70	12,70	11,80	0,41	2,65	0,26	2,35	10,6	99,05
Mata da Corda.													
Arenito esverdeado e matriz arenosa de conglomerado da	P3	55,60	8,56	3,87	15,80	2,69	3,57	0,13	4,46	0,15	1,79	2,73	99,35
Formação Capacete, Grupo Mata da Corda	P9-I	21,40	9,08	2,91	15,97	21,87	6,09	0,12	2,98	0,22	1,06	17,9	99,68

Rochas contendo silicatos insolúveis são materiais de difícil decomposição. Por isso, de acordo com os métodos clássicos estabelecidos pelo MAPA, a determinação de teores de nutrientes requer a fluorização das amostras em meio ácido, no qual o silício é volatilizado na forma de tetrafluoreto de silício. Após o preparo das soluções, as leituras são feitas em fotômetro de chama, espectrômetro de absorção ou de emissão atômica (Brasil, 2024). Uma técnica

analítica mais simples, amplamente usada nas determinações de elementos maiores em amostras e que dispensa o uso de reagentes controlados, é a fluorescência de raios X. Nesse método, a preparação das amostras é feita por prensagem ou a fusão, formando pastilhas. Na fusão, ocorre a dissolução em altas temperaturas de uma amostra oxidada em um solvente adequado, formando um disco de vidro. Espera-se correlação entre os métodos, uma vez que ambos promovem a quebra da estrutura dos silicatos (Vendemiatto & Enzweiler, 2003). Contudo, a fluorescência de raios X não permite avaliar teores solúveis em água ou em ácidos fracos, os quais são mais diretamente correlacionáveis às soluções do solo.

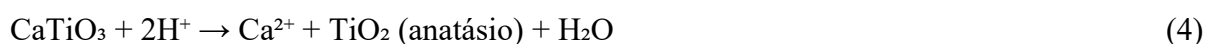
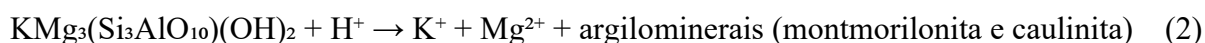
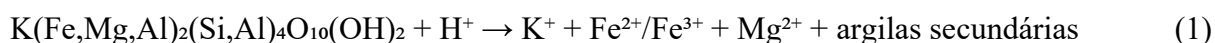
Avaliação do potencial como fertilizantes e remineralizadores

A análise integrada dos dados petrográficos e geoquímicos obtidos neste estudo permite uma avaliação preliminar do potencial agrogeológico das rochas analisadas, considerando também o contexto legal e produtivo dos agrominerais no Brasil. Normas como a Instrução Normativa do MAPA nº 39 (2018) reforçam a importância estratégica dos insumos minerais alternativos e a necessidade de aprofundar o conhecimento geológico sobre rochas que possam servir como fontes regionais de nutrientes. Nesse sentido, buscou-se avaliar se tanto os arenitos e siltitos verdes da Formação Serra da Saudade (Grupo Bambuí), quanto as rochas vulcânicas ultrabásicas da Formação Patos e os arenitos e conglomerados da Formação Capacete (Grupo Mata da Corda) apresentam características mineralógicas e químicas compatíveis com o aproveitamento agrogeológico. Este estudo limita-se a uma avaliação da mineralogia e da química de rocha total dos principais litotipos da região. E, por ser uma análise preliminar, não considera todos os requisitos previstos na Lei nº 6.894 (1980) e seus respectivos regulamentos e instruções normativas, que dispõem sobre fertilizantes, remineralizadores e demais insumos destinados à agricultura.

Os arenitos e siltitos verdes da Formação Serra da Saudade apresentam mineralogia constituída por quartzo, muscovita, feldspatos, illita, caulinita e glauconita, sendo esta última o principal foco agrônomo. A glauconita, filossilicato potássico reconhecido como fonte para produção de fertilizante de liberação lenta (Pereira et al., 2019; Schimicoski, 2025), libera K, Fe e Mg durante o intemperismo por meio de reações como a representada pela equação 1. Diversos autores apontam que sua taxa de liberação é moderada a lenta, porém contínua, característica desejável em remineralizadores (Moreira et al., 2016). No contexto de fertilizantes

minerais, os siltitos verdes da Formação Serra da Saudade (Grupo Bambuí) apresentam limitações marcantes: embora o teor de K_2O seja moderado, os valores de P_2O_5 , CaO e MgO são baixos, não atingindo os requisitos mínimos para registro como fertilizante. Quando avaliadas sob a perspectiva de remineralizadores, essas rochas também não atendem às exigências legais. A sílica livre varia entre 40% e 55%, ultrapassando significativamente o limite máximo de 25% estipulado pela Instrução Normativa do MAPA nº 5 (2016), o que por si só impede sua classificação. Quanto aos macronutrientes K, Ca e Mg, o desempenho é apenas parcial: o potássio apresenta valores adequados (média de 4,59%), superior ao mínimo de 1% estabelecido pela normativa (Figura 9A), porém a soma de bases ($CaO + MgO + K_2O$) não alcança o limite requerido de 9%, atingindo no máximo 7,43% (Figura 9B). Assim, apesar do teor favorável de K, o conjunto das exigências legais não é cumprido, inviabilizando uma composição única dessas rochas como remineralizador. Entretanto, podem ser avaliadas alternativas como a mistura com outros materiais.

As rochas vulcânicas ultrabásicas da Formação Patos exibem mineralogia composta por diopsídio, flogopita, perovskita, richterita, sanidina, apatita e magnetita, além de fases secundárias como montmorilonita, caulinita, hematita, goethita, iddingsita e wavellita. Essa associação indica um sistema originalmente enriquecido em K, Mg, Ca, Fe e P, essenciais para o desenvolvimento vegetal. Durante o intemperismo, essas fases sofrem decomposição liberando nutrientes de forma gradual (Krauskopf & Bird, 1995; Nesse, 2012; Weaver, 1989; White & Brantley, 2003), comportamento coerente com reações típicas, como a liberação de K e Mg pela flogopita (Equação 2); liberação de Ca e Mg pelo diopsídio (Equação 3); liberação de Ca e Ti pela perovskita (Equação 4) e liberação de P pela apatita (Equação 5).





Faroutine (2018) indica que o intemperismo de piroxênios, micas e apatita gera argilominerais de alta capacidade de troca catiônica (CTC) e capacidade de retenção de água, como montmorilonita e caulinita, aumentando a retenção de nutrientes no solo. Os resultados de DRX obtidos neste estudo confirmam esse modelo. A amostra P13-I está visualmente mais alterada pelo intemperismo, mais friável, com maior o volume de óxidos de ferro, argilominerais e titanita, indicando estágios avançados de transformação hidrotermal e supergênica, coerentes com kamafigitos alterados descritos em outras regiões da Província Alcalina do Alto Paranaíba (Brod et al., 2000; Figueiredo et al., 2018; Leonardos et al., 1991; Sgarbi et al., 2000; Sgarbi et al., 2004; Silva et al., 2025b). Assim, estas rochas da Formação Patos apresentam elevado potencial agrogeológico devido à combinação de minerais primários ricos em nutrientes, fases secundárias com alta CTC e presença de fosfatos secundários como a wavellita, confirmada pelos difratogramas.

No âmbito dos fertilizantes minerais, as rochas vulcânicas ultrabásicas da Formação Patos (Grupo Mata da Corda), apesar de apresentar composição geoquímica enriquecida, não atingem os valores mínimos exigidos para esse enquadramento. A soma do percentual em peso de macronutrientes primários ($\text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$) é de 4,70%, inferior ao mínimo de 15% estabelecido pela Instrução Normativa nº 39/2018 do MAPA para fertilizantes minerais mistos. Contudo, quando avaliadas quanto ao potencial como remineralizadores, mostram desempenho amplamente favorável. As amostras não apresentam sílica livre, atendendo a um dos critérios essenciais da Instrução Normativa do MAPA nº 5 (2016). Além disso, exibem concentrações significativas de macronutrientes: o teor médio de K_2O (2,42%) supera confortavelmente o limite mínimo de 1% (Figura 9C) e a soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) alcança valores entre 25% e 27%, muito acima do mínimo regulamentar de 9% (Figura 9D). Esses resultados evidenciam que as rochas da Formação Patos satisfazem integralmente os requisitos legais para uso como remineralizadores, destacando-se como material de elevado potencial agrônomo.

As rochas da Formação Capacete apresentam marcada heterogeneidade textural e composição predominantemente detrítica, constituída por quartzo, feldspatos, fragmentos líticos e argilominerais resultantes do retrabalhamento de material vulcânico. Do ponto de vista químico, os arenitos conglomeráticos não atendem aos requisitos mínimos para classificação como fertilizante, devido aos baixos teores de P_2O_5 , CaO e MgO . Quanto ao uso como

remineralizador, sua limitação mais significativa é o elevado conteúdo de sílica livre: aproximadamente 40% da rocha é composta por quartzo, valor que excede amplamente o limite máximo de 25% definido pela Instrução Normativa do MAPA nº 5 (2016). Apesar disso, os macronutrientes presentes exibem níveis compatíveis com a normativa. O teor médio de K_2O (3,72%) é superior ao mínimo exigido de 1% (Figura 9E), e a soma de bases ($CaO + MgO + K_2O$) alcança valores entre 10% e 30% (Figura 9F).

Por fim, ao comparar os teores médios das rochas estudadas com produtos já registrados pelo MAPA (Tabela 3), percebe-se contrastes significativos entre as unidades estudadas. As rochas da Formação Serra da Saudade exibem baixos teores de P_2O_5 e Mg, mas apresentam K_2O moderado; contudo, o elevado teor de sílica livre inviabiliza seu enquadramento como remineralizador. As rochas vulcânicas ultrabásicas da Formação Patos contrastam significativamente por exibirem teores elevados de Ca, Mg e valores adequados de K_2O , sem a presença de sílica livre, o que as coloca em posição comparável a insumos já registrados, como o fosfato natural reativo (FNR) e o kamafugito moído. Já os arenitos conglomeráticos da Formação Capacete apresentam enriquecimento químico relevante, com Ca, Mg e K_2O , mas o teor de sílica livre (ou seja, a proporção de quartzo) em torno de 40% impede seu uso como remineralizador.

Recomenda-se a avaliação do uso destas rochas como fontes de micronutrientes (B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Si e Zn), sendo necessárias análises de teores totais e teores solúveis em ácido cítrico a 2% (obrigatório para B, Co, Fe, Mo, Ni e Zn) e teores solúveis em Citrato Neutro de Amônio (CNA) + água na relação 1:1 (obrigatório para Cu e Mn), conforme previsto na Instrução Normativa do MAPA nº 39 (2018). Por exemplo, na Tabela 3 são apresentados os teores de silício (Si), elemento importante para absorção e disponibilidade de nutrientes, melhoria da eficiência fotossintética, formação de barreiras físicas e defesa contra pragas, mitigação de estresses abióticos, maior produção de biomassa e grãos (Reis et al., 2007). Tais análises devem ser complementadas por uma avaliação de contaminantes, bem como de sua eficiência agrônômica, tanto para aplicação via solo, fertirrigação, sementes, hidroponia ou foliar. Outra possibilidade é o uso destas rochas como porcentagem de carga para ajuste de formulação de fertilizantes minerais mistos (Instrução Normativa nº 5, 2016).

Figura 9: A. Teor de K_2O (%) nas amostras da Formação Serra da Saudade (Grupo Bambuí), com destaque para o limite mínimo de 1%. B. Soma dos teores de $CaO + MgO + K_2O$ (%) nas mesmas amostras, comparada ao valor mínimo de 9%; C. Teor de K_2O (%) nas amostras da Formação Patos (Grupo Mata da Corda), com destaque para o limite mínimo de 1%. D. Soma dos teores de $CaO + MgO + K_2O$ (%) nas mesmas amostras, comparada ao valor mínimo de 9%; E. Teor de K_2O (%) nas amostras da Formação Capacete (Grupo Mata da Corda), com destaque para o limite mínimo de 1%. F. Soma dos teores de $CaO + MgO + K_2O$ (%) nas mesmas amostras, comparada ao valor mínimo de 9% previsto na Instrução Normativa do MAPA nº 5 (2016).

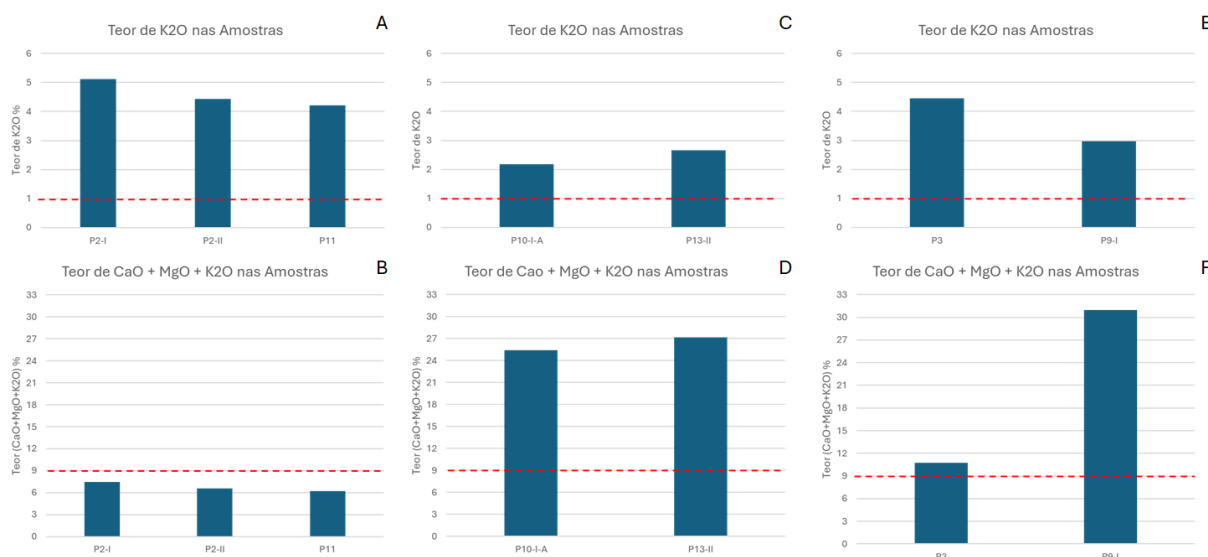


Tabela 3: Comparação entre teores totais de macronutrientes primários (P_2O_5 e K_2O), secundários (Ca e Mg) e do micronutriente silício (Si) das rochas estudadas (teores médios) e produtos registrados pelo MAPA conforme especificações do Anexo I da Instrução Normativa do MAPA nº 39 (2018)

Material / Produto	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	Ca (%)	Mg (%)	Si (%)	Referência
Siltitos verdes da Formação Serra da Saudade (média)	0,04	4,59	-	1,28	29,35	Este estudo
Rochas vulcânicas ultrabásicas da Formação Patos (média)	2,40	2,40	8,28	7,41	15,14	Este estudo
Arenitos conglomerático da Formação Capacete (média)	1,43	3,72	8,86	2,81	18,02	Este estudo
Fosfato Natural (FN)	5,00	-	(>1)	-	-	IN nº 39/ 2018
Fosfato Natural Reativo (FNR)	12,00	-	10,00	-	-	IN nº 39/ 2018
Siltito Glauconítico	-	8,00	-	-	25,00	IN nº 39/ 2018
Kamafugito moído	3,00	3,00	2,80	2,40	15,00	IN nº 39/ 2018

Considerações Finais

- Neste trabalho foi feita uma avaliação preliminar do potencial de rochas da região do Alto Paranaíba, MG, para uso como fertilizantes e remineralizadores, com base em dados petrográficos e geoquímica de rocha total.
- Os siltitos e arenitos verdes da Formação Serra da Saudade, embora apresentem glauconita, exibem elevados teores de sílica livre e baixos valores de Ca e Mg, o que limita sua aplicação como fonte direta de nutrientes. As rochas ultrabásicas da Formação Patos mostram mineralogia rica em fases contendo K, Ca, Mg, Fe e P, como flogopita, fosfatos e sanidina. A ausência de quartzo e o conjunto de macronutrientes presentes confere a esse litotipo o maior potencial agrogeológico entre os avaliados, tanto pela composição química favorável quanto pela tendência a liberar nutrientes de forma gradual. Os arenitos e conglomerados da Formação Capacete, apesar de apresentarem teores significativos de Ca, Mg e K, possuem alto conteúdo de quartzo, o que reduz sua eficiência como remineralizadores e limita sua aplicabilidade agrícola.
- Embora o uso individual possa estar limitado, é possível avaliar composições mistas para que atendam aos requisitos legais atuais. Para trabalhos futuros, sugere-se a determinação de elementos potencialmente tóxicos, bem como o grau de liberação de nutrientes em diferentes frações granulométricas e, posteriormente, ensaios de incubação.

Referências

- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2024). *Manual de Métodos Analíticos Oficiais de Fertilizantes, Corretivos, Substratos, Condicionadores e Remineralizadores de Solo*. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/lfda/legislacao-metodos-da-rede-lfda/fertilizantes-corretivos-substratos-e-inoculantes>
- Brasil. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos (2021). *Plano Nacional de Fertilizantes – Horizonte 2050*. <https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/planos/plano-nacional-fertilizantes/@@download/file/Plano-Nacional-Fertilizantes.pdf>
- Brod, J. A., Gibson, S. A., Thompson, R. N., Junqueira-Brod, T. C., Seer, H. J., Moraes, L. C. de, & Boaventura, G. R. (2000). The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP), southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3), 408–412. <https://ppegio.igc.usp.br/portal/index.php/rbg/the-kamafugitecarbonatite-association-in-the-alto-paranaiba-igneous-province-apip-southeastern-brazil/>
- Costa Júnior, A., Santos, S. R., Pereira, G. L., & Santos, W. O. (2024). Glauconite as a potential source of potassium in Brazilian agriculture: A review. *Revista Ciência Agronômica*, 55, e20238828. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20240037>
- Costa, L. L., Santos, J. C. M., Messias, J. V. D., Silva, A. A., Almeida, A. M., & Fonseca, A. C. R. (2023). Avaliação dos efeitos da adição de kamafugito no solo no cultivo de rabanete: Uma investigação para a agricultura sustentável. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 9(12), 944–953. <https://doi.org/10.51891/rease.v9i12.12654>
- Dasi, E., Rudmin, M., & Banerjee, S. (2024). Glauconite applications in agriculture: A review of recent advances. *Applied Clay Science*, 253, 107368. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107368>
- Decreto nº 8.384, de 29 de dezembro de 2014 (2014). Regulamenta dispositivos da Lei nº 6.894/1980 e da Lei nº 12.890/2013. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/decreto/d8384.htm
- Dias, P. H. A., Carneiro, M. L. S., & Andrade, K.W. (2011). *Geologia da Folha São Gotardo*

(SE.23-Y-D-I). CODEMIG/UFMG.

Duarte, L. M., Xavier, L. V., Rossati, K. F., Oliveira, V. A., Schimicoski, R. S., Neto, C. N. A., & Mendes, G. O. (2022). Potassium extraction from the silicate rock Verdete using organic acids. *Scientia Agricola*, 79(2). <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0164>

Faroutine, G. (2018). *Eficiência agrônômica do kamafigito como fonte de fósforo e potássio para a cultura do feijão*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia]. Repositório Institucional – Universidade Federal de Uberlândia. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/23729>

Figueiredo, C. A., Chaves, A. O., Sgarbi, P. B. de A., & Fernandes, M. L. S. (2018). O processo de analcimização de um kamafigito (Luz262) do centro-oeste mineiro. *Geonomos*. 26(1). <https://doi.org/10.18285/geonomos.v26i1.1233>

Fragoso, D. G. C., Suckal, G. L., Guerzoni, H. T. G., Sanglard, J. C. D., Faria, P. H., & Uhlein, A., (2011). *Geologia da Folha Presidente Olegário (SE.23-Y-B-I)*. CODEMIG/UFMG.

Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018. (2018) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-39-2018-fert-minerais-versao-publicada-dou-10-8-18.pdf>

Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 (2016). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/in-5-de-10-3-16-rem mineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf>

Krauskopf, K. B., & Bird, D. K. (1995). *Introduction to geochemistry*. McGraw-Hill.

Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980 (1980). Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/16894.htm

Leonardos, O. H., Ulbrich, M. N. C., & Gaspar, J. C. (1991). *Mata da Corda volcanic rocks*. Field Guide Book. <https://repositorio.usp.br/item/000824797>

- Lima, O. N. B., Uhlein, A., & Britto, W. (2007). Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Geology*, 37(4), 204–215. <https://ppegeo.igc.usp.br/portal/wp-content/uploads/tainacan-items/15906/47268/9235-10869-1-SM.pdf>
- Manning, D. A. C. (2021). Rock dust, crop nutrition, and climate change: A review. *Anais do IV Congresso Brasileiro de Rochagem* (p. 90). Serviço Geológico do Brasil. https://www.sgb.gov.br/remineralizadores/media/anais_ivcbr_2021.pdf
- Martins, E. S., Oliveira, C. G. de, Resende, Á. V. de, & Matos, M. S. F. de. (2008.). *Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais: Alternativas de potássio para a agricultura* (Cap. 09). CETEM. <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/publicacoes/livros/rmi/09-AGROMINERAIS-ROCHAS-SILICATICAS.pdf>
- Martins, E. S., Resende, Á. V. de, Oliveira, C. G. de, & Furtini Neto, A. E. (2010). *Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos* (Cap. 5). CETEM/MCT. <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/907>
- Martins, E. S., Theodoro, S. H., Bernardez, F. F. G., Luchese, A. V., Bergmann, M., Siqueira, D. S., Teixeira, A., Azevedo, A., & Curtis, J. C. D. (2024, November 8). Produção brasileira de remineralizadores e fertilizantes naturais: 2019 a 2023. *ABREFEN – Associação Brasileira dos Produtores de Remineralizadores de Solo e Fertilizantes Naturais*. <https://abrefen.org.br/2024/11/08/artigos-producao-brasileira-de-remineralizadores-e-fertilizantes-naturais-2019-a-2023/>
- Medeiros, F. P., Theodoro, S. H., Carvalho, A. M. X., Oliveira, V. S., Oliveira, L. C., Almeida, R. M. P., Viana, M. B., & Gomide, C. S. (2025). The combination of crushed rock and organic matter enhances the capture of inorganic carbon in tropical soils. *Journal of South American Earth Sciences*, 152, 105254. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105254>
- Migliavaca, G. S., Gomes, S. O., & Batista, F. P. S. (2022). Análise agronômica da adubação com remineralizadores associado a mix de plantas de cobertura na cultura do feijão. *Revista REAL*, 1(1). <https://revistas.icesp.br/index.php/Real/article/viewFile/4318/2184>
- Moreira, D. S., Uhlein, A., Dussin, I. A., Uhlein, G. J., & Misuzaki, A. M. P. (2020). A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 99,

102503. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102503>

- Moreira, D. S., Uhlein, A., Fernandes, M. L. S., Mizusaki, A. M., Galéry, R., & Delbem, I. D. (2016). Estratigrafia, petrografia e mineralização de potássio em siltitos verdes do Grupo Bambuí. *Geociências*, 35(2), 157–171. <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/11373>
- Nesse, W. D. (2012). *Introduction to mineralogy*. Oxford University Press.
- Pereira, A. C., Gomes, M. R. S., & Rocha, S. D. F. (2019). Glauconita como fonte alternativa de potássio. *Geonomos*, 32–37. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v27i1.21851>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1987). Petrography of common sands and sandstones. *Sand and sandstone* (pp. 139–213). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5_5
- Reis, H. L. S. (2011a). *Estratigrafia e tectônica da Bacia do São Francisco na zona de emanações de gás natural do baixo Rio Indaiá (MG)*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto]. Repositório Institucional. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10002>
- Reis, H. L. S. (2011b). *Geologia da Folha Serra Selada (SE.23-Y-B-V)*. CODEMIG/UFMG.
- Reis, T. H. P., Guimarães, P. T. G., Figueiredo, F. C., Pozza, A. A. A., Nogueira, F. D., Rodrigues, C. R. *O silício na nutrição e defesa de plantas*. EPAMIG. <https://livrariaepamig.com.br/wp-content/uploads/2023/02/BT-82-O-Silicio-na-Nutricao-e-Defesa-de-Plantas-.pdf>
- Schimicoski, R. S., Oliveira, K. D. de, Mendes, G. de O., & Ávila Neto, C. N. de. (2025). Production of potassium fertilizer from verdetite: A review. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 11(1), 21569–21569. <https://doi.org/10.18540/jcecvl11iss1pp21569>
- Sgarbi, P. B. A., Gaspar, J. C., & Valença, J. G. (2000). Brazilian kamafugites. *Brazilian Journal of Geology*, 30(3), 417–420. <https://ppegio.igc.usp.br/portal/wp-content/uploads/tainacan-items/15906/43223/10663-12828-1-SM.pdf>
- Sgarbi, P. B. A., Heaman, L. M., & Gaspar, J. C. (2004). U–Pb perovskite ages for Brazilian kamafugitic rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(8), 715–724. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2003.12.005>

SGS Geosol Laboratórios Ltda (2025a). Proposta Comercial QT-030533/0.

SGS Geosol Laboratórios Ltda (2025b). Certificado de análises GQ2516092.

Silva, L. A., Rezende, C. R. de, Teodoro, M. A. M., Perboni, V. M. P., Faria, A. L. P. de, Brandão, L. W., Pires, N. J., & Oliveira, M. S. (2025b). Caracterização mineralógica de um kamaugito do noroeste mineiro: Associação e liberação mineral. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 22, <https://doi.org/10.4322/2176-1523.2025.3225>

Silva, P. B., Carvalho, A. M. de, Junqueira, A. M. R., Soares, J. P. G., Sá, M. A. C. de, Marchi, G., Martins, E. S., Figueiredo, C. C., Santos, L. F., Sousa, T. R., Oliveira, A. D. de. (2025a). Soil carbon and nitrogen in silicate agromineral-managed pasture: A seven-year study in the Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 60. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2025.v60.04133>

Souza, C. H. E., et al. (2023). Glauconitic siltstone: Additive for ammonia retention. *Geologia USP – Série Científica*, 23(3). <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v23-189192>

Theodoro, S. H., Leonardos, O., Lyra Rocha, E., & Garrido Rego, K. (2022). Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. *Revista Espaço e Geografia*, 9(2), 263–292. <https://doi.org/10.26512/2236-56562006e39794>

Uhlein, A., Freitas, A. M., Cruz, A. B., Silva, W. F., Caxito, F., A., & Moreira, G. C., (2011). *Geologia da Folha Carmo do Paranaíba (SE.23-Y-B-IV)*. CODEMIG/UFMG.

Vendemiatto, M A., Enzweiler, J. 2003. Robustez e versatilidade na análise de amostras geológicas por fluorescência de raios X. *Geochimica Brasiliensis*, 17 (2): 75-80. <https://geobrasiliensis.emnuvens.com.br/geobrasiliensis/article/view/200>

Weaver, C. E. (1989). *Clays, muds, and shales*. Elsevier.

White, A. F., & Brantley, S. L. (2003). The effect of time on the weathering of silicate minerals. *Chemical Geology*, 202(3–4), 479–506. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.03.001>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Francisco Augusto dos Santos Ribeiro: Elaboração, coleta, organização e análise dos dados, tabelas, figuras, mapas, escrita e discussão; Lucas Vieira Carvalho Souza: Elaboração, coleta, organização e análise dos dados, tabelas, figuras, mapas, escrita e discussão; Alexandre Uhlein: Discussão, orientação e revisão; Débora Silvano Moreira: Concepção e coordenação da pesquisa, discussão, orientação e revisão.

Financiamento: Esta pesquisa é resultado de um Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, realizado com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, Chamada 011/2024 – Alysson Paolinelli, Processo APQ-05535-24) e com o apoio institucional do Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC/IGC/UFMG).

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.

Uso de Inteligência Artificial: Os autores declaram que ferramentas de inteligência artificial generativa (ChatGPT e Copilot) foram utilizadas durante a preparação deste manuscrito exclusivamente para aprimoramento das traduções e revisão textual. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para gerar resultados científicos, interpretações ou conclusões. Os autores revisaram e aprovaram integralmente a versão final do manuscrito e assumem total responsabilidade pelo conteúdo apresentado.