



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Zoneamento Agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu Entorno

Leonardo de Matos Araujo¹, Flávia Cristina Silveira Braga², Éder de Souza Martins³

¹Doutorando em Geologia Econômica e Aplicada, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Instituto de Geociências, Centro de Pesquisa Professor Manuel Teixeira da Costa, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.623, Pampulha, CEP: 31230-901, Belo Horizonte/MG, (31) 98231-7667, leonardoaraujogeologo@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0003-4433-941X>); ²Doutora em Geologia Econômica e Aplicada, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Instituto de Geociências, Centro de Pesquisa Professor Manuel Teixeira da Costa, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.623, Pampulha, CEP: 31230-901, Belo Horizonte/MG, (31) 99793 2564, flaviacsbraga@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5467-900X>); ³Doutor em Geologia, Universidade de Brasília (UNB), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, BR 020, km 18, Rod. Brasília/Fortaleza, Pedologia, Cx. P. 08223, Planaltina, CEP 73310-970, Brasília/DF, (61) 3388-9803, eder.martins@embrapa.br (<https://orcid.org/0000-0003-2881-683X>)

Artigo recebido em 19/02/2025 e aceitado em 16/09/2025

RESUMO

A dependência do Brasil de fertilizantes importados é um desafio estratégico, com 86,1% dos insumos adquiridos no mercado externo. Essa vulnerabilidade afeta especialmente as principais fronteiras agrícolas do país, como a região oeste da Bahia, onde se insere o Chapadão Urucuia. Este estudo teve como foco a prospecção e avaliação de rochas com potencial uso como remineralizadores de solo (pó de rocha), com ênfase na identificação de fontes regionais de potássio, fósforo, cálcio e magnésio. Considerando que esses insumos apresentam liberação gradativa dos nutrientes ao solo, foram elaborados mapas temáticos que indicam não apenas sua distribuição espacial, mas também seu grau de reatividade. A pesquisa integrou análises químicas, físicas e mineralógicas, bem como técnicas de geoprocessamento aplicadas ao zoneamento agrogeológico do Chapadão Urucuia e entorno. Os principais destaques foram o biotita-xisto do Grupo Rio Preto, em Formosa do Rio Preto (BA), com 6,32% de K₂O, 7,71% de MgO e 4,21% de CaO; e o carbonatito do Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias, em Campo Alegre de Lourdes (BA), com 10,8% de P₂O₅ e 12,9% de CaO. Os materiais analisados apresentaram teores de potássio, fósforo, cálcio e magnésio compatíveis com os critérios exigidos pelo MAPA para certificação de remineralizadores, além de baixos níveis de elementos potencialmente tóxicos, o que garante segurança ambiental e viabilidade de uso. Além de promover a nutrição sustentável das plantas, essas fontes regionais representam uma alternativa estratégica para reduzir a dependência de insumos externos e mitigar riscos associados às crises do mercado internacional de fertilizantes, fortalecendo a segurança agrícola do oeste baiano.

Palavras-chave: Agrogeologia; Agromineral; Remineralizadores; Reatividade; Sustentabilidade.

Agrogeological Zoning of the Urucuia Plateau and its Surroundings

ABSTRACT

Brazil's dependence on imported fertilizers is a strategic challenge, with 86.1% of agricultural inputs sourced from foreign markets. This vulnerability particularly affects the country's main agricultural frontiers, such as the western region of Bahia, where the Urucuia Plateau is located. This study focused on the prospecting and evaluation of rocks with potential for use as soil remineralizers (rock powders), emphasizing the identification of regional sources of potassium, phosphorus, calcium, and magnesium. Considering the gradual nutrient release typical of these inputs, the research included the development of thematic maps that indicate both the spatial distribution of agrominerals and their degree of reactivity. The methodology integrated chemical, physical, and mineralogical analyses, along with geoprocessing techniques applied to the agrogeological zoning of the Urucuia Plateau and its surroundings. The main highlights were the biotite-schist from the Rio Preto Group, in Formosa do Rio Preto (BA), containing 6.32% K₂O, 7.71% MgO, and 4.21% CaO; and the carbonatite from the Angico dos Dias Metacarbonatitic Complex, in Campo Alegre de Lourdes (BA), with 10.8% P₂O₅ and 12.9% CaO. The analyzed materials presented potassium, phosphorus, calcium, and magnesium levels consistent with the criteria established by the Brazilian Ministry of Agriculture for remineralizer certification, in addition to low concentrations of potentially toxic elements, ensuring environmental safety and agricultural viability. Beyond promoting sustainable plant nutrition, these regional sources represent a strategic alternative to reduce dependency on external inputs and mitigate risks associated with international fertilizer market crises, strengthening agricultural security in western Bahia.

Keywords: Agrogeology; Agromineral; Remineralizers; Reactivity; Sustainability.

Introdução

Reconhecido como um dos maiores produtores agrícolas do mundo, o Brasil enfrenta o desafio de ampliar sua produtividade de forma sustentável, reduzindo impactos ambientais e, sobretudo, a elevada dependência de fertilizantes importados — responsáveis por 86,1% do consumo nacional (ANDA, 2024). Essa vulnerabilidade torna-se ainda mais evidente ao se considerar a origem por nutriente: o país importa 100% dos fertilizantes nitrogenados, 73,8% dos fosfatados e 98% dos potássicos (FAOSTAT, 2023). Diante da instabilidade do mercado internacional, garantir a segurança alimentar e a soberania agrícola exige soluções inovadoras e sustentáveis. Para isso, é essencial compreender a dinâmica dos solos e identificar fontes alternativas de nutrientes que complementem ou substituam os fertilizantes convencionais.

Entre as alternativas mais promissoras destacam-se os remineralizadores de solo — materiais de origem mineral, submetidos apenas a processos mecânicos — que têm demonstrado significativo potencial na melhoria das propriedades físico-químicas e biológicas dos solos (Glorieux & Delmelle, 2022; Buss et al., 2023). Esses insumos oferecem liberação gradual de nutrientes essenciais, como fósforo e potássio, com impactos positivos em culturas de alta relevância econômica, como soja e milho (Machado et al., 2008; Nasser et al., 2022). Estudos recentes reforçam que a reintrodução de resíduos minerais, na forma de pós de rocha, pode contribuir para um modelo agrícola mais sustentável (Chiwona et al., 2020; Manning & Theodoro, 2020; Swoboda et al., 2022; Brod & Blaskowski, 2024).

Apesar dos avanços no entendimento do uso desses materiais, ainda são escassas as investigações em escala regional, especialmente no Brasil. A identificação de litologias específicas e o conhecimento de suas propriedades mineralógicas e geoquímicas são fundamentais para o desenvolvimento do Zoneamento Agrogeológico (ZAGEO), que integra dados sobre solos e agrominerais em sistemas cartográficos (Martins et al., 2017; Magalhães et al., 2024). Embora algumas iniciativas nacionais já tenham sido conduzidas, persistem lacunas no mapeamento detalhado e na avaliação sistemática do potencial agrícola de diversas regiões (Prado & Martins, 2019).

Nesse contexto, a caracterização mineralógica das rochas destinadas ao uso como remineralizadores assume papel central, especialmente pelas variações estruturais e composicionais que influenciam diretamente a liberação de nutrientes. Estudos recentes têm

ressaltado que, além da composição química total, fatores como o arranjo cristalino e a mineralogia exercem papel determinante na reatividade dos agrominerais e, consequentemente, na eficácia agronômica dos materiais aplicados ao solo (Krahl et al., 2022).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo realizar o zoneamento agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu entorno, com foco na identificação e caracterização de fontes minerais regionais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio. A proposta inclui a elaboração de mapas temáticos de reatividade mineral, baseados em dados geológicos, geoquímicos e mineralógicos, a fim de subsidiar práticas agrícolas mais sustentáveis e reduzir a dependência externa de fertilizantes. A escolha dessa abordagem se justifica pela escassez de estudos em escala regional sobre remineralizadores no oeste da Bahia, especialmente em níveis de detalhe compatíveis com a realidade agrícola e logística local.

Localização da área de estudo

A área de estudo foi delimitada com base na distribuição do Grupo Urucuia no estado da Bahia, que engloba uma ampla extensão das áreas agricultáveis do oeste baiano, situadas no chapadão homônimo. A partir dos limites dessa unidade geológica, definiu-se uma área com raio de 300 quilômetros, com o objetivo de garantir a viabilidade logística das regiões identificadas como potenciais (Figura 1). Essa delimitação considerou o transporte como um fator crucial para a viabilidade econômica e operacional, dado o elevado volume de remineralizadores necessário em comparação aos fertilizantes convencionais (Martins et al., 2023).

Contexto geológico

O Grupo Urucuia, unidade litoestratigráfica predominante na área de estudo, é composto por arenitos finos a médios, conglomerados e siltitos de idade neocretácea (Sgarbi et al., 2001). Esta unidade se destaca pela sua importância hidrogeológica, formando o principal aquífero da região, com potencial estratégico para o abastecimento hídrico e o suporte à agricultura irrigada. Os depósitos sedimentares do Grupo Urucuia, associados a processos fluviais e eólicos, conferem características únicas aos solos da região, com variações texturais que influenciam a retenção de água e nutrientes (Barbosa, 2016).

Estudos como o de Donagemma et al. (2016) destacam a presença de Neossolos Quartzarênicos no Cerrado brasileiro. No oeste da

Bahia, esses solos, oriundos do intemperismo do Grupo Urucua, são classificados como leves e possuem textura arenosa a franco-arenosa, o que dificulta a prática agrícola devido à baixa retenção de água e nutrientes e à alta susceptibilidade à erosão. No entanto, práticas modernas, como o plantio direto e os sistemas integrados de produção, têm viabilizado a exploração sustentável dessas áreas, promovendo melhorias na estrutura do solo e aumentando a sustentabilidade agrícola (Embrapa, 2020).

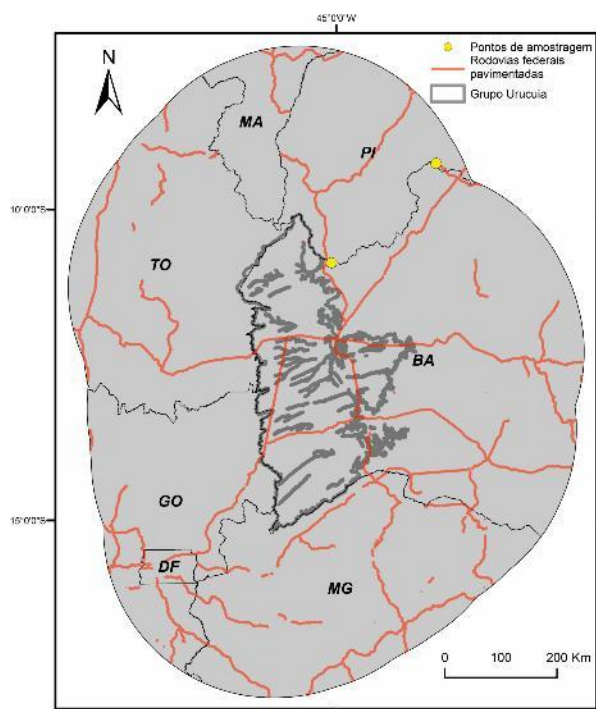


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, e os principais municípios de produção agrícola do cerrado baiano. O raio de 300 km foi criado a partir da borda do Grupo Urucua presente no Estado da Bahia.

A área de estudo apresenta uma complexidade geológica significativa, pois abrange porções do Cráton do São Francisco, bem como faixas móveis associadas à Província Tocantins, incluindo as faixas Brasília e Araguaia, além da Província Sedimentar do Parnaíba (Figura 2).

Inserida no Cráton do São Francisco, a porção central da Bahia, próximo ao município de Irecê, destaca-se como potencial para agrominerais pela Formação Salitre, do Grupo Una, que inclui unidades como Irecê, Jussara, Gabriel, Lapão, Nova América e Sarandi. Essa unidade é a principal portadora de rochas fosfatadas na região. Sanches (1997) identificou teores médios de 33,4% de P_2O_5 em amostras da unidade fosfatada, particularmente na Unidade B1, que compreende as unidades Lapão, Nova América e Sarandi. Essas litologias são formadas por dolomitos silicosos e intraclásticos,

enriquecidos por processos intempéricos e depositados em ambientes de planície de maré (Misi e Kyle, 1994). A caracterização mineralógica e geoquímica das amostras foi realizada por meio de análises petrográficas, difratometria de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e microsonda eletrônica, permitindo a identificação do carbonato-fluorapatita como principal mineral fosfático presente.



Figura 2 - Províncias Tectônicas do Brasil e localização da área de estudo.

De acordo com Rezende (2021), o Grupo Rio Preto contém uma ampla diversidade de rochas metassedimentares, incluindo metadiamiclitos, mármore dolomíticos, xistos grafitosos, muscovita-xistos, xistos manganíferos, gonditos e quartzitos, destacando-se pelo seu potencial como fonte de potássio. O Grupo Bambuí, por sua vez, é constituído por uma alternância de siliciclásticos finos e carbonatos, englobando pelitos, arenitos, siltitos e calcários, com relevante potencial para fosfato e calcário (Alkmim e Martins-Neto, 2012).

Na região do município de Guanambi (BA), o Batólito de Guanambi, e em especial o Maciço Ceraíma, tem sido alvo de estudos sobre rochas fontes potenciais para potássio. Essa região apresenta afloramentos de sienitos máficos porfiríticos na base, seguidos por sienitos faneríticos leucocráticos (Paim, 2014). A fácies sienítica com maior teor de K_2O é composta por microclina (77%), biotita (11%) e clinopiroxênio (11%) (Braga et al., 2014), com um potencial mineral estimado em 67,9 Mt a partir de um cut-off de 12,5% de K_2O . Segundo Krahl et al. (2022), essas rochas possuem um elevado potencial para liberação de potássio, especialmente quando reduzidas à fração fina ($<53 \mu m$), devido à presença predominante de biotita ferro-magnésiana. A alteração química da biotita no ambiente rizosférico

leva à formação de hidrobiotita, promovendo a liberação gradual do potássio interlaminar. Contudo, a relação Fe/Mg nos sítios octaédricos da biotita influencia a estabilidade da estrutura mineral, reduzindo a taxa de liberação de K₂O (Krahl et al., 2022).

Na porção norte da área de estudo, inserida na Bacia do Parnaíba, ocorrem extensas unidades carbonáticas, sendo a Formação Pedra do Fogo a mais representativa. Essa unidade apresenta uma sedimentação cíclica composta por chert e calcário oolítico/pisolítico, de coloração creme a branca, frequentemente estromatolítico, intercalado com arenitos finos a médios amarelados, folhelhos cinza e anidritas esbranquiçadas (Faria Jr., 1979).

No sul do Piauí, as rochas pertencentes ao Grupo Canindé (Formações Pimenteira, Cabeças e Longá) também apresentam ocorrências de fosfato. Sachs et al. (2009) identificaram teores de P₂O₅ entre 5% e 25% na Formação Pimenteira, sendo os valores mais elevados encontrados em carbonatos e nódulos fosfáticos. A Formação Cabeças, em sua porção basal, apresenta teores de P₂O₅ de até 10%, em arenitos piritosos intercalados com argilitos e calcários impuros fosfatados. Já a Formação Longá possui teores de até 10% de P₂O₅, associados a arenitos, siltitos e folhelhos. Young (2006) interpretou essas rochas como depósitos marinhos rasos, formados sob influência de marés, tempestites e superfícies transgressivas de inundação máxima.

A Faixa Brasília é constituída por rochas metassedimentares, metavulcânicas e granitóides intrusivos, com idades entre 2,0 Ga e 630 Ma (Pimentel et al., 2011). Já a Faixa Araguaia é composta por rochas metassedimentares e metavulcânicas de baixo a médio grau metamórfico (Moura et al., 2008). Ambas as faixas são conhecidas por seus depósitos de níquel laterítico, fosfato e rochas ultramáficas, recursos estratégicos para a agricultura e a indústria mineral (Fuck et al., 1994; Uhlein et al., 2012).

Na Faixa Brasília, depósitos fosfatados são registrados nas unidades Coromandel, Rocinha e Lagamar, estando associados às formações do Grupo Canastra e Grupo Paranoá (Pimentel et al., 2011; CPRM, 2019). Já na porção noroeste de Minas Gerais, unidades da Formação Serra da Saudade apresentam ocorrências de potássio, devido à presença de verdetes em siltitos verdes, como observado na região de São Gotardo (MG) (Moreira, 2015).

Estudos de Costa e Oliveira (1970) indicam que a illita é o mineral predominante nesses verdetes, com teores de K₂O entre 6,2% e 10%. Valarelli et

al. (1993) estimaram 1,5 bilhões de toneladas de rochas potássicas em Cedro do Abaeté (MG), com teor médio de 11% de K₂O, além da presença de lentes fosfatadas com teores de até 27% de P₂O₅. Ackroyd et al. (2014) identificaram uma sequência de meta-argilitos glauconíticos laminados, com teor variando entre 6% e 12% de K₂O.

Demanda regional de fertilizantes

A produção agrícola no oeste baiano ocupa uma extensa área de agricultura de sequeiro das principais culturas (Figura 3). O mais recente levantamento do conselho técnico da Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia (AIBA), safra 2024/25, demonstrou que houve um crescimento da área cultivada de 7% da safra 2023/2024 para a estimada de 2024/2025, o que consequentemente vem acompanhado por um aumento proporcional na demanda por fertilizantes (Tabela 1).

De acordo com Lacerda et al. (2015), a adubação recomendada para o milho em solos de fertilidade construída no Cerrado é de 312 kg/ha de NPK 10-32-10 na semeadura e 263 kg/ha de ureia em cobertura. Para a soja, as doses indicadas são de 303 kg/ha de NPK 10-32-10 na semeadura e 75 kg/ha de KCl em cobertura. Com base nesses parâmetros, a demanda total de NPK no Cerrado baiano para as culturas de milho (sequeiro e irrigado) e soja é estimada em aproximadamente 683.463 toneladas, evidenciando a alta relevância desses fertilizantes para a produtividade agrícola da região.

Material e métodos

Geoprocessamento e Elaboração dos Mapas

O processo de geoprocessamento foi conduzido com o objetivo de gerar mapas temáticos representando a reatividade das rochas da região estudada quanto à liberação de fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Para isso, foi construída uma malha amostral regular, com pontos equidistantes a cada 25 km, cobrindo todo o recorte espacial do estudo. Essa malha resultou em 1.529 pontos de amostragem.

A identificação da litologia em cada ponto foi realizada a partir da base cartográfica em escala de 1:1.000.000 disponibilizada pela plataforma GeoSGB®, do Serviço Geológico do Brasil (SGB). Além da malha regular, foram incorporados ao banco de dados 29.581 pontos de afloramentos geológicos disponíveis na mesma plataforma, complementados por informações obtidas em campo (Figura 4).

Tabela 1 - Produção agrícola, em hectares, das principais culturas no oeste baiano. Apenas o algodão tem sua produtividade em arroba/hectare. Fonte: AIBA (2024).

Culturas	Safr 2023/24			Previsão Safr 2024/25			Variações (%) Fechamento Safr 2022/23 e Previsão Safr 2023/24		
	Área (ha)	Produt. (sacas/ha)	Produção (t)	Área (ha)	Produt. (sacas/ha)	Produção (t)	Produt.	Área	Produção (t)
Soja	1.980.000	63	7.484.400	2.129.000	67	8.558.580	6,3%	7,5%	14,4%
Algodão*	345.000	326	1.687.050	380.000	326	1.858.200	0,0%	10%	10%
Milho	110.000	150	990.000	105.000	170	1.071.000	13,3%	-5%	8,2%
Milho Irrigado	25.000	160	240.000	18.000	180	194.400	12,5%	-28%	-
Trigo	7.000	90	37.800	7.000	100	42.000	11,1%	0%	11,1%
Sorgo	150.000	60	540.000	160.000	60	576.000	0,0%	7%	6,7%
Sub-Total	2.167.000		10.161.450	2.799.000		11.487.780		7%	

Em cada ponto da malha e dos afloramentos, foi associada a litologia e classificada a reatividade da rocha quanto à liberação de nutrientes (Tabela 2), com base nos critérios de dissolução de minerais estabelecidos por Córrea e Oliveira (2024). As classes de reatividade foram atribuídas de forma qualitativa, variando de 0 a 3, considerando as taxas de dissolução e o nutriente majoritário potencialmente disponível. Nas unidades geológicas compostas por múltiplas litologias, foi selecionada a

rocha de maior reatividade como representativa da unidade.

Após a consolidação do banco de dados, os dados foram interpolados por meio do método da Krigagem Ordinária, utilizando modelo de semivariograma esférico, considerado adequado para variáveis com dependência espacial e distribuição contínua (Isaaks & Srivastava, 1989; Li & Heap, 2008). O procedimento foi realizado no software ArcGIS® 10.7 (ESRI, 2019).

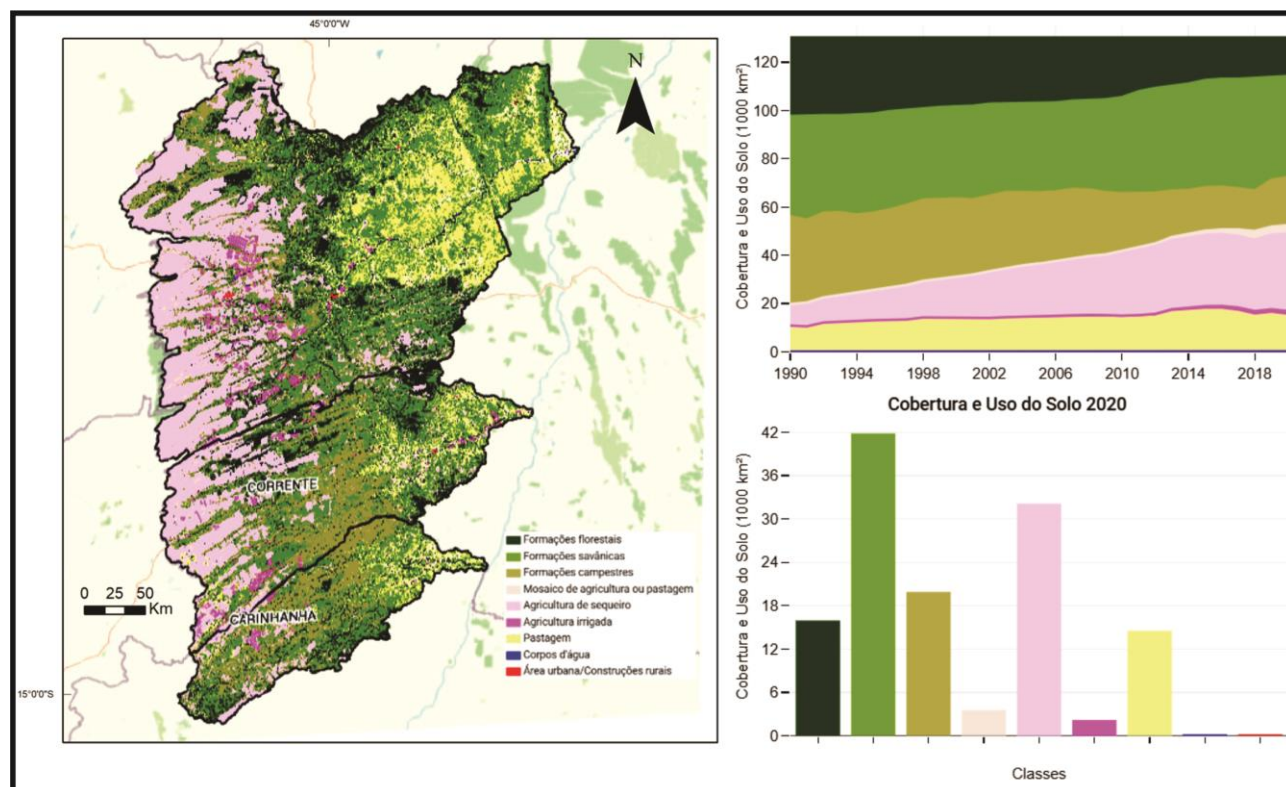


Figura 3 - Distribuição do uso e ocupação do solo no oeste baiano. Fonte: Plataforma OBahia - Inteligência Territorial e Hídrica para o Oeste da Bahia.

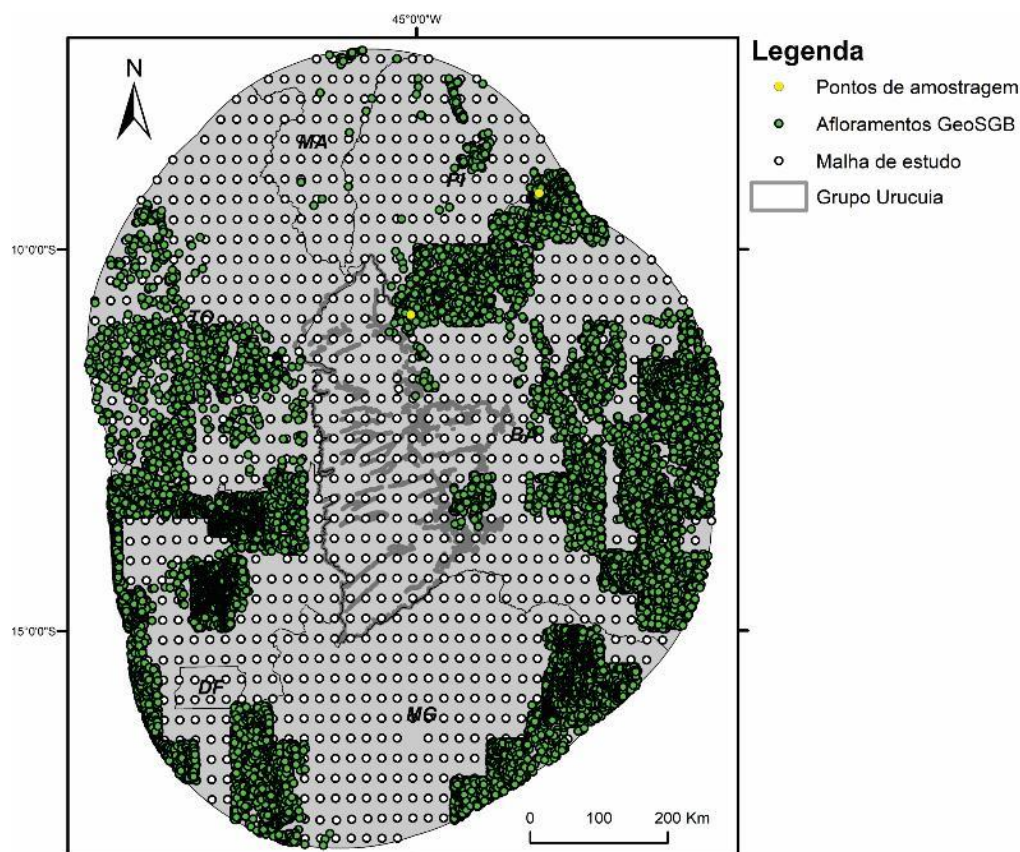


Figura 4 - Mapa com a distribuição dos pontos amostrados e selecionados para análises geoquímicas (esferas amarelas), afloramentos da plataforma GeoSGB (esferas verdes), malha equidistante criada para o estudo (esferas brancas), área de estudo e o Grupo Urucua em destaque.

Como resultado, foram elaborados quatro mapas temáticos qualitativos, representando o grau de reatividade de fósforo, potássio, cálcio e magnésio pelas rochas da região. A simbologia dos mapas foi estruturada por rampas de cores, indicando as classes de reatividade de cada elemento, com o objetivo de fornecer subsídios para a identificação de áreas prioritárias para o uso de agrominerais regionais.

Amostragem e preparação

Foram coletadas em campo 18 amostras de rochas, provenientes das áreas de maior potencial identificadas na etapa de geoprocessamento. Inicialmente, foi realizada uma análise macroscópica, com o objetivo de estimar a composição mineralógica e avaliar a probabilidade de enquadramento das rochas como remineralizadores de solo, conforme os critérios do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2017). Nessa triagem, foi considerada a presença de minerais com potencial de liberação de nutrientes (média a alta reatividade) essenciais à agricultura.

As amostras com predominância de muscovita como mineral potássico foram descartadas nessa etapa preliminar, uma vez que a muscovita

apresenta baixa reatividade, de acordo com a classificação de Córrea e Oliveira (2024), reduzindo a eficácia como fonte de potássio para uso agrícola. As demais amostras seguiram para análise mineralógica por DRX.

Com base nos resultados de DRX, foram selecionadas as duas amostras mais representativas e promissoras para avanço nas análises químicas complementares. A primeira corresponde a um biotita-xisto, coletado no Grupo Rio Preto, no município de Formosa do Rio Preto/BA, visando avaliar o fornecimento de potássio e magnésio. A segunda é um carbonatito, (saprólito) do Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias, em Campo Alegre de Lourdes/BA, selecionado pela boa reatividade para liberação de fósforo e cálcio. Essas amostras apresentaram os melhores resultados quanto à presença de minerais altamente reativos, de acordo com a tabela de reatividade proposta por Córrea e Oliveira (2024).

Foram coletadas em campo duas amostras para caracterização: um biotita-xisto, proveniente do Grupo Rio Preto, em Formosa do Rio Preto/BA; e outra de carbonatito, do Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias, em Campo Alegre de Lourdes/BA.

Tabela 2. Diferentes Taxas de Dissolução de minerais relevantes para utilização como agrominerais. Compilado elaborado por Côrrea e Oliveira (2024), baseado em Lasaga et al. (1994) e Palandri e Kharaka (2004).

TAXA DE DISSOLUÇÃO (log mol.m ⁻² .s ⁻¹)	GRUPOS MINERAIS	USO E OCORRÊNCIAS
ALTA (≥ -5,00)	Cloretos (silvita, carnalita); Sulfatos (gipsita, anidrita, 5460ísico5460ta, kainita); Carbonatos (calcita, dolomita, magnesita); Fosfatos (carbonatoapatita, hidroxiapatita); Nefelina ; Vidro vulcânico ; Micas (glauconita).	A maior parte da produção mundial de potássio provém de evaporitos (i.e., cloretos e sulfatos), enquanto os fertilizantes fosfatados são produzidos predominantemente a partir de fosforitos sedimentares e carbonatitos. Carbonatos e sulfatos são associados principalmente a rochas sedimentares e metamórficas e amplamente utilizados para a correção da acidez do solo, além de fontes de Ca e Mg. A maioria dos remineralizadores é composta por minerais silicáticos, que apresentam taxa de dissolução intermediária e que têm como função alterar os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e
MÉDIA (<-5,00 e ≥-10,00)	Feldspatoides (leucita, kalsilita); Zeólita ; Olivinas (forsterita); Plagioclásios cálcicos (anortita-labradorita); Piroxênios (diopsídio-hedenbergita, egrina-augita); Anfibólios (tremolita-actinolita, hornblenda); Epidoto (zoisita); Micas (biotita-flogopita); Plagioclásios sódicos (andesina-albita); Sulfetos (pirita, pirrotita, calcopirita); Óxidos (hematita, magnetita).	micronutrientes para as plantas, bem como promover a melhoria das propriedades físicas, 5460ísico-químicas ou da atividade biológica do solo. Esses remineralizadores são representados por um amplo espectro composicional (químico e mineralógico) de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.
BAIXA (<-10,00)	Feldspatos potássicos (microclínio, ortoclásio, sanidina); Micas (muscovita); Filossilicatos (pirofilita, talco, clorita, serpentina); Argilominerais (esmectita, ilita, caulinita); Quartzo ; Hidroxidos (gibbsita, goethita, limonita).	Os grupos minerais que apresentam taxa de dissolução baixa (feldspato potássico, muscovita e quartzo) estão associados a um volumoso conjunto de rochas fêlsicas (ígneas, metamórficas e sedimentares), representadas em grande proporção por granitos, gnaisses e quartzitos.

As amostras escolhidas foram preparadas no laboratório SGS (Vespasiano/MG), onde passaram por secagem, britagem e homogeneização. Posteriormente, foram pulverizadas até atingir granulometria de 95% passante na malha 150# (0,105 mm), atendendo às exigências do MAPA (2017). Essa preparação garantiu a uniformidade e a representatividade das amostras para as análises geoquímicas e mineralógicas subsequentes.

Procedimentos Analíticos

Análise mineralógica

As amostras selecionadas foram submetidas a diferentes análises laboratoriais para caracterização

mineralógica e química, visando a avaliação do potencial agromineral das rochas.

A DRX foi realizada no Centro de Pesquisas Professor Manuel Teixeira da Costa (CPMTC/UFMG), utilizando um difratômetro Panalytical Expert PRO, com radiação CuKα1 (λ = 1,54060 Å). As análises foram conduzidas em varredura contínua de 5° a 70° 2θ, com passo de 0,02° e tempo de leitura de 1 s por passo. A identificação dos minerais foi realizada com auxílio do software *HighScore Plus*, utilizando os bancos de dados COD e ICDD. Para a amostra de biotita-xisto, também foi realizada análise petrográfica em lâmina delgada sob microscópio óptico de luz polarizada.

Análises químicas

A composição química total das amostras foi determinada por FRX, no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), em Goiânia/GO, utilizando um espectrômetro Bruker S8 Tiger. Para a determinação dos óxidos principais (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 , Na_2O e MnO), foi utilizada a técnica de fusão, com preparação das amostras por pulverização em moinho planetário de bolas com jarra de ágata, secagem em estufa a 105 °C por 12 horas e posterior calcinação a 1.000 °C por 5 horas, para determinação da perda ou ganho ao fogo (LOI/GOI). Em seguida, as amostras foram fundidas com tetraborato de lítio na proporção de 1:9, e os discos de análise foram confeccionados por fusão.

Para a análise dos óxidos menores e elementos-traço (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pb, Th, U e Cd), foram preparadas pastilhas prensadas, a partir de 15 g de amostra pulverizada homogeneizada com aglutinante. A prensagem foi realizada com aplicação de 15 toneladas de força, seguindo os procedimentos padrão do CRTI.

Adicionalmente, foram realizadas análises de fertilidade do solo, visando simular a disponibilidade potencial dos nutrientes pelas rochas. Para isso, foi utilizada a metodologia de extração com ácido tartárico a 1% e fluoreto de sódio (NaF), seguindo protocolos de análise de remineralizadores. Foram determinados os teores de macronutrientes (P_2O_5 , K_2O , CaO e MgO) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn, Fe, B, Mo e Co), além da quantificação de elementos potencialmente tóxicos, como Cd e Pb.

Esses procedimentos permitiram avaliar tanto a composição mineralógica e química total das amostras quanto a fração potencialmente biodisponível dos nutrientes, aspectos fundamentais para a certificação e aplicação agrícola dos materiais.

Resultados

Caracterização

a química, mineralógica e física das amostras

As análises realizadas permitiram descrever a composição mineralógica, química e física das amostras de biotita-xisto e carbonatito.

Na amostra de biotita-xisto, a análise por DRX indicou a presença de 46,5% de biotita, 23,6% de quartzo, 21,1% de flogopita e 8,9% de anortita (Figura 5).

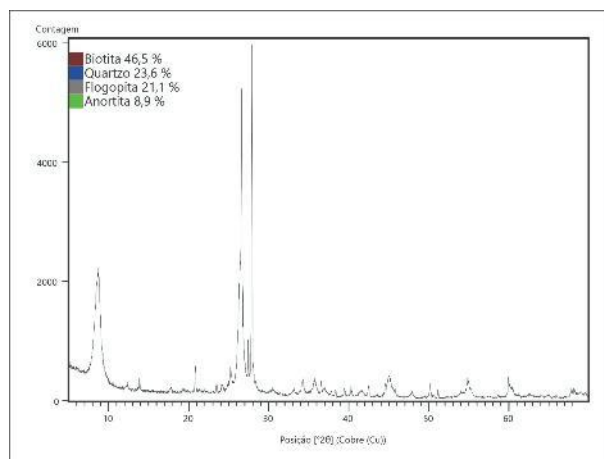


Figura 5 - Difratograma da amostra do biotita-xisto, com quantificação mineralógica obtida pelo método de Rietveld.

Complementarmente, a análise petrográfica (Figura 6) revelou a proporção de 76% de biotita, 20% de quartzo, 3% de plagioclásio e 1% de minerais opacos. O quartzo ocorre em lentes bem definidas, com extinção ondulante, enquanto o plagioclásio aparece em grãos subédricos. Os minerais opacos estão dispersos na matriz da rocha. A textura observada é xistosa, com granulometria variando de fina a média.

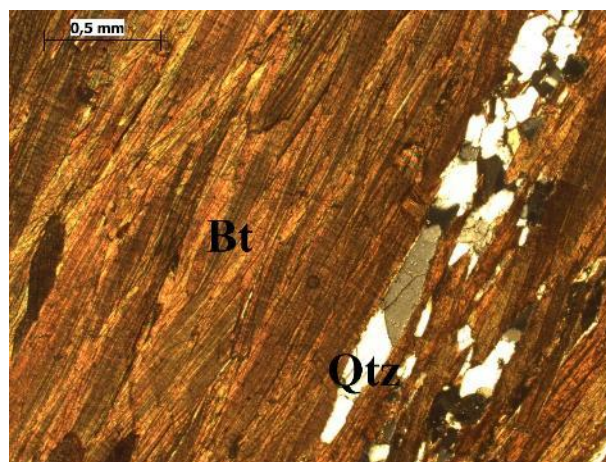


Figura 6 - Fotomicrografia do biotita-xisto, luz transmitida, nicóis descruzados, onde é possível visualizar biotita (Bt) e quartzo (Qtz).

A amostra de carbonatito apresentou composição mineralógica formada por 57,4% de quartzo, 20,5% de fluorapatita, 8,4% de hematita, 7,2% de goethita, 3,4% de goyazita e 3,1% de caulinita (Figura 7).

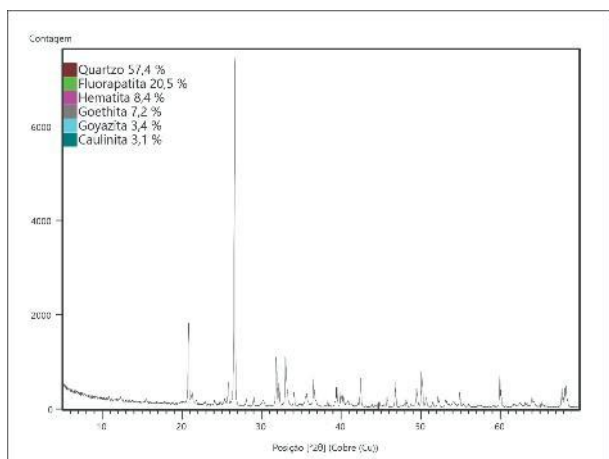


Figura 7 - Difratograma da amostra do carbonatito, com quantificação mineralógica obtida pelo método de Rietveld.

A composição química total do biotita-xisto, determinada por FRX, apresentou os seguintes teores de óxidos maiores: 40,02% de SiO₂, 15,03% de Al₂O₃, 16,09% de Fe₂O₃, 7,71% de MgO, 4,21% de CaO e 6,32% de K₂O (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise química de FRX dos óxidos maiores e dos elementos menores analisados da amostra do biotita-xisto (LQ = abaixo do limite quantificável).

Oxidos maiores analisados (%)	Limite mínimo de detecção (ppm)	Elementos menores analisados (ppm)	Resultados do biotita-xisto
SiO ₂	-	-	40,02
TiO ₂	-	-	1,44
Al ₂ O ₃	-	-	15,03
Fe ₂ O ₃	-	-	16,09
MnO	-	-	0,33
MgO	-	-	7,71
CaO	-	-	4,21
Na ₂ O	-	-	0,43
K ₂ O	-	-	6,32
P ₂ O ₅	-	-	<LQ
SO ₃	-	-	<LQ
LOI(%)	-	-	8,58
Soma(%)	-	-	100,15
-	5	Sc	21
-	15	V	126
-	20	Cr	325
-	10	Co	44
-	10	Ni	123
-	15	Cu	37
-	20	Zn	249
-	5	Ga	28
-	10	As	<LQ
-	10	Rb	327
-	20	Sr	58

-	15	Y	312
-	20	Zr	287
-	5	Nb	30
-	20	Mo	<LQ
-	10	Sn	<LQ
-	10	Sb	<LQ
-	50	Ba	1134
-	15	La	568
-	20	Ce	136
-	15	Pb	<LQ
-	10	Th	<LQ
-	10	U	<LQ
-	10	Cd	<LQ

A extração de nutrientes disponíveis com ácido tartárico a 1% e NaF foi realizada apenas na amostra de biotita-xisto, para estimar a fração potencialmente biodisponível de nutrientes. Os resultados indicaram a extração de 4,70% de K₂O e 1,8% de MgO, enquanto os teores de fósforo e cálcio foram residuais (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultado da análise de fertilização e corretivo do biotita-xisto.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cd	mg/kg	2
Pb	mg/kg	33
K ₂ O (total)	%	6,00
pH	.	6,6
P ₂ O ₅ (total)	%	0,16
CaO (total)	%	1,90
MgO (total)	%	5,50
SiO ₂	%	31,6
B	mg/kg	1,0
Co	mg/kg	1,5
Mo	mg/kg	1,1
Cu	mg/kg	56
Fe	mg/kg	112000
Mn	mg/kg	1800
Zn	mg/kg	160
Pass. 2,00 mm	%	100,0
Ret. 2,00 mm	%	0,0
Pass. 0,84 mm	%	99,0
Ret. 0,84 mm	%	1,0
Pass. 0,30 mm	%	88,0
Ret. 0,30 mm	%	12,0
Cl	%	0,10
K ₂ O (Ac. Tart 5% + 0,5		
NaF)	%	4,70
S.B.	%	13,40

Na amostra de carbonatito, a análise de nutrientes disponíveis foi realizada diretamente por métodos de fertilidade do solo, sem a utilização do ácido tartárico (Tabela 5). Nessa amostra, foram obtidos 4,8% de P₂O₅ e 6,5% de CaO, com teores de magnésio e potássio próximos de zero.

Tabela 5 - Resultado da análise de fertilização e corretivo do carbonatito.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cd	mg/kg	2
Pb	mg/kg	29
K ₂ O (total)	%	0,24
Ph	.	6,5
P ₂ O ₅ (total)	%	10,80
CaO (total)	%	12,90
MgO (total)	%	0,40
SiO ₂	%	49,5
B	mg/kg	0,8
Co	mg/kg	1,1
Mo	mg/kg	1,0
Cu	mg/kg	26
Fe	mg/kg	105000
Mn	mg/kg	660
Zn	mg/kg	80
Pass. 2,00 mm	%	100,0
Ret 2,00 mm	%	0,0
Pass. 0,84 mm	%	100,0
Ret. 0,84 mm	%	0,0
Pass. 0,30 mm	%	100,0
Ret. 0,30 mm	%	0,0
Cl	%	0,11
S.B.	%	13,54

Em ambas as amostras, os teores de Cd e Pb permaneceram abaixo dos limites máximos estabelecidos pela legislação vigente para a certificação de remineralizadores.

As análises físicas complementaram a caracterização dos materiais (Tabelas 4 e 5). No biotita-xisto, a granulometria indicou que 88% das partículas passaram pela peneira de 0,3 mm, 99% em 0,84 mm e 100% em 2 mm (Figura 8). O pH foi de 6,6. No carbonatito, a análise granulométrica revelou

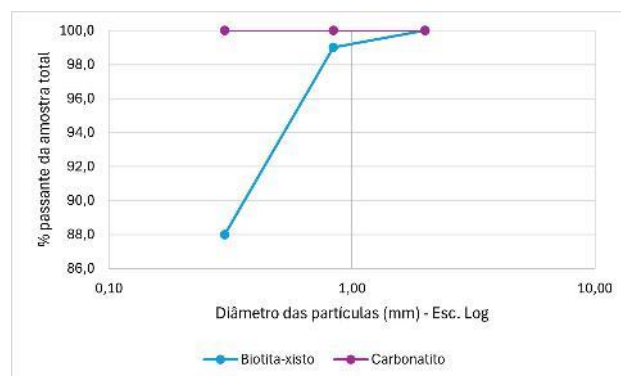


Figura 8 - Curva granulométrica da análise de fertilidade e corretivo das amostras do biotita-xisto (cor azul) e carbonatito (cor roxo).

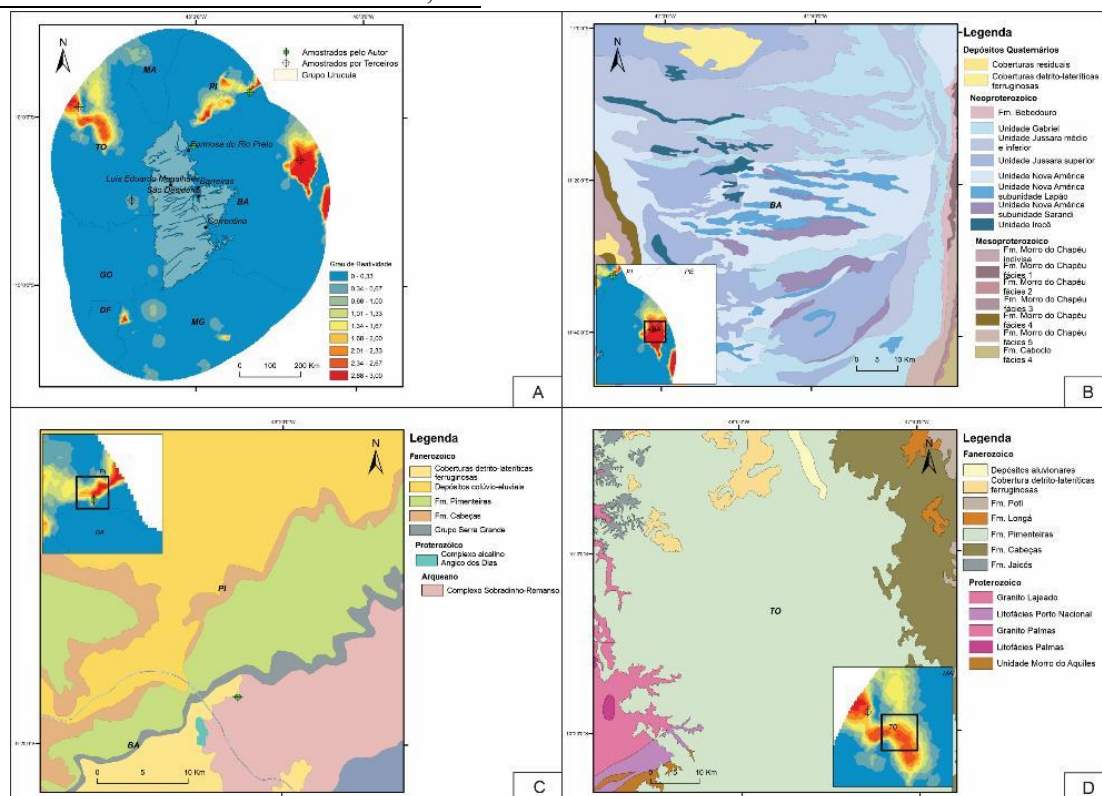


Figura 9 – (a) Mapa do grau de reatividade de rochas fosfatadas; (b) Geologia da região de Irecê/BA; (c) Região sul do Estado do Piauí; (d) Porção central do Estado do Tocantins (d). Os locais exatos das amostragens feitas por terceiros são apenas aproximados.

que 100% das partículas passaram por todas as malhas analisadas (0,3 mm, 0,84 mm e 2,0 mm). O pH foi de 6,5.

Mapeamento agrogeológico

No mapa gerado para rochas fosfatadas, foram identificadas três áreas de maior potencial (Figura 9). Na porção leste da área de estudo, próximo ao município de Irecê, foram identificadas zonas de maior potencial fosfático associadas às unidades da Formação Salitre (Grupo Una), contemplando os municípios de Irecê, Jussara, Gabriel, Lapão, Nova América e Sarandi.

Na porção norte da área de estudo, as rochas pertencentes ao Grupo Canindé, mais especificamente as Formações Pimenteiras, Cabeças e Longá, apresentaram alta reatividade fosfática. A porção noroeste da área de estudo também apresentou alta representatividade na reatividade de rochas fosfatadas, em decorrência das rochas dos Grupos Canindé (Formações Longá e Pimenteiras) e Balsas (Formação Pedra de Fogo).

No mapa de reatividade de rochas potássicas, foram identificadas três áreas de maior interesse devido aos elevados teores de potássio (Figura 10).

Na região do município de Guanambi (BA), destacam-se as áreas do Batólito de Guanambi, especialmente o Maciço Ceraíma.

No município de Formosa do Rio Preto (BA), o Grupo Rio Preto apresentou zonas de alta reatividade potássica na porção centro-norte da área mapeada. Na região noroeste de Minas Gerais, bem como em porções esparsas na região sul, observou-se reatividade elevada em porções da Formação Serra da Saudade, conhecida por apresentar ocorrências de verdetes em siltitos verdes, conforme registrado por Moreira (2015).

No mapa de distribuição de rochas magnesianas e cálcicas, observa-se que as zonas de alta reatividade são coincidentes em várias porções, e associadas às unidades compostas por carbonatos, especialmente na porção norte da área de estudo, a qual está inserida no contexto geológico da Bacia do Parnaíba (Figuras 11a e 11b). A Formação Pedra do Fogo se destaca no mapa de rochas cálcicas, devido à presença de rochas carbonáticas (Figura 11c).

A porção norte do Estado de Minas Gerais teve como destaque os calcários dolomíticos da Fm.

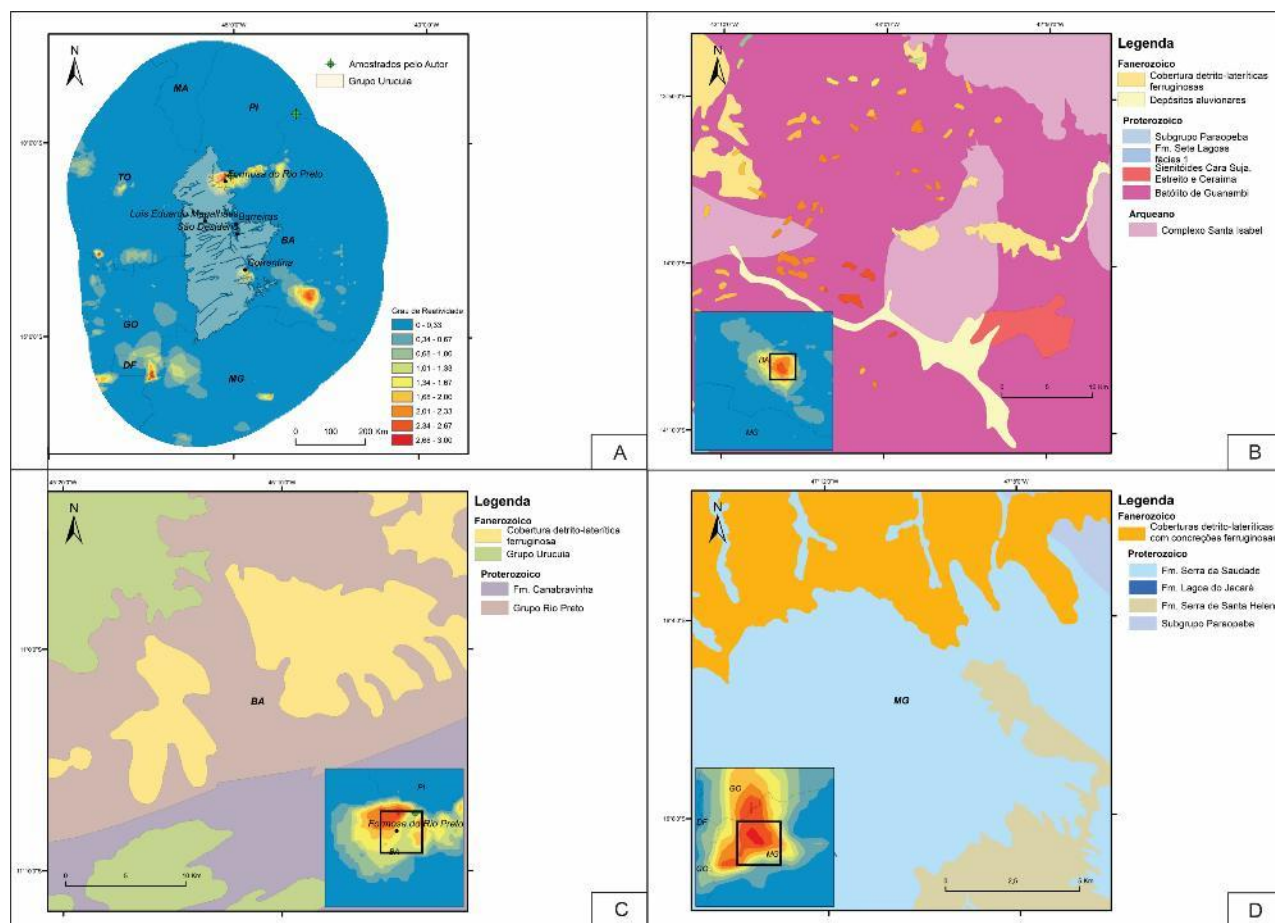


Figura 10 - (a) Mapa do grau de reatividade de rochas potássicas; (b) Mapa geológico da região de Guanambi/BA, com foco no Batólito Guanambi; (c) Mapa geológico com foco no Grupo Rio Preto; (d) Formação Serra da Saudade, no setor noroeste do estado de Minas Gerais.

Serra de Santa Helena, que contribuiu para uma alta reatividade no mapa magnesiano (Figura 11d).

Discussões

Relevância e limitações do ZAGEO

O zoneamento agrogeológico realizado neste estudo configura uma importante ferramenta estratégica para a identificação de áreas com potencial para fornecimento de nutrientes via remineralizadores, promovendo alternativas à dependência de fertilizantes importados. Entretanto, os mapas temáticos elaborados devem ser interpretados considerando algumas limitações metodológicas inerentes à base de dados utilizada. O mapa geológico do GeoSGB, na escala de 1:1.000.000, adota uma descrição litológica abrangente para várias unidades, frequentemente agrupando diferentes tipos de rochas sob a mesma classificação. Essa generalização pode influenciar diretamente o resultado das interpolações, uma vez que nem todas as litologias contidas em uma mesma unidade possuem potencial agromineral ou

apresentam os mesmos níveis de reatividade. Assim, o zoneamento agrogeológico apresentado deve ser compreendido como uma ferramenta preliminar e indicativa, e não como um diagnóstico definitivo.

Outro aspecto relevante é que algumas unidades geológicas foram consideradas potenciais para fornecimento de nutrientes com base em informações provenientes da literatura científica, conforme descrito nos capítulos anteriores. A Formação Serra da Saudade é um exemplo desse procedimento: dados de Moreira (2015) indicam a presença de verdetes em siltitos verdes, reconhecidos como fontes potássicas devido à presença de minerais micáceos com liberação gradativa de potássio. Entretanto, tais ocorrências são pontuais e restritas a determinadas áreas da formação, o que reforça a necessidade de estudos complementares de campo para validar a distribuição real desses materiais.

Apesar dessas restrições, o zoneamento agrogeológico proposto oferece uma base valiosa para orientar políticas públicas, iniciativas privadas e programas de incentivo ao uso de agrominerais regionais. Ele também representa um ponto de

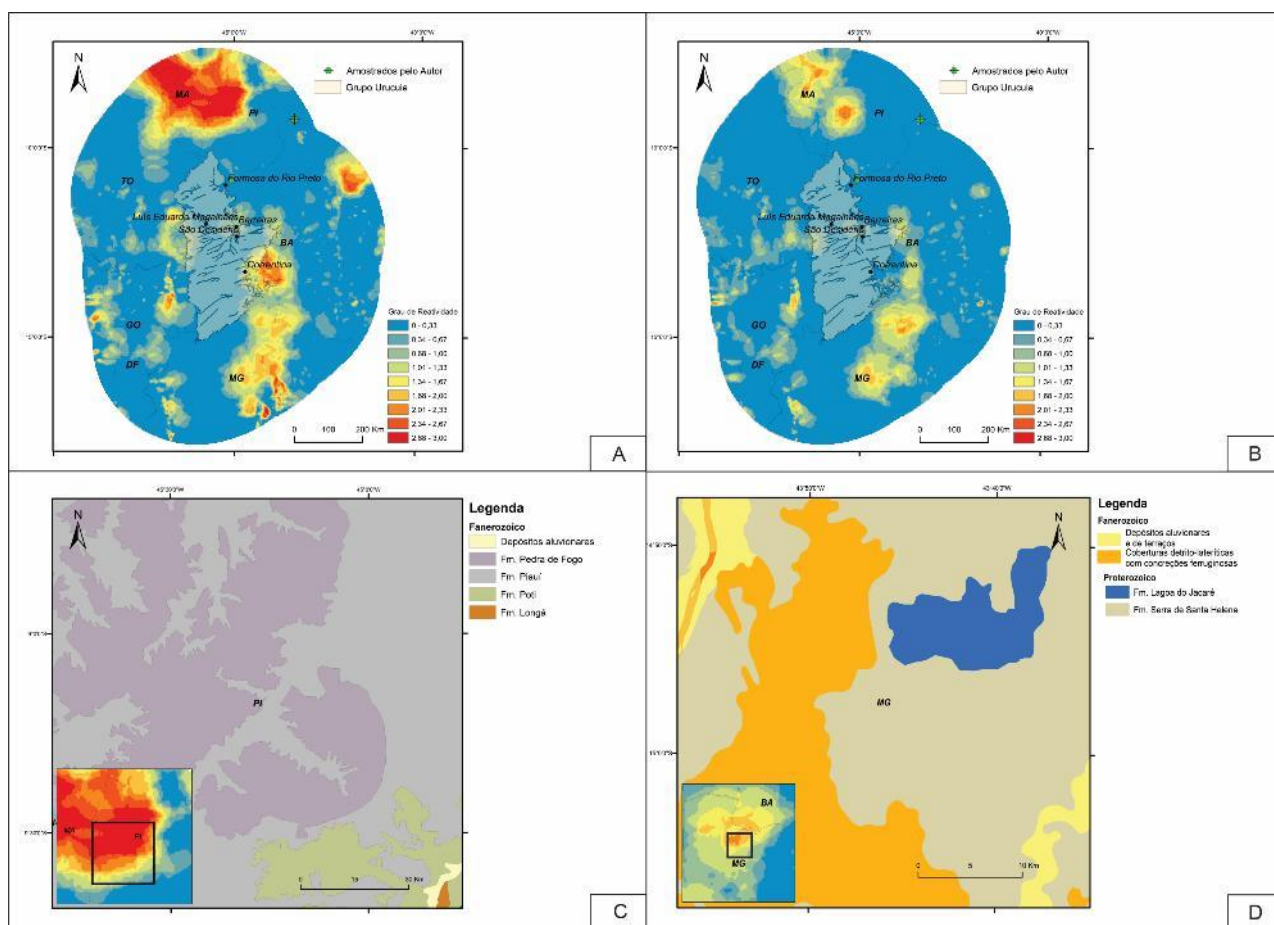


Figura 11 – (a) Mapa do grau de reatividade de rochas cálcicas, (b) Mapa do grau de reatividade de rochas magnesianas; (c) Mapa geológico da região oeste do Piauí; (d) Mapa geológico da região norte de Minas Gerais.

partida para estudos em escalas mais detalhadas, permitindo que futuras pesquisas possam refinar as informações e direcionar esforços para as áreas de maior viabilidade econômica e logística.

Unidades geológicas potenciais

Além das amostras analisadas, a análise dos mapas de reatividade evidencia que o Grupo Bambuí é uma das unidades geológicas mais relevantes em termos de potencial agromineral (Figuras 9, 10 e 11). Conforme a classificação de Côrrea e Oliveira (2024), esse grupo engloba litologias tanto primárias quanto secundárias (Figura 12), entre as quais se destacam os verdetes da Formação Serra da Saudade, importantes fontes de potássio (Moreira, 2015), e os carbonatos da Formação Sete Lagoas, reconhecidos pelo seu potencial fosfatado (Ribeiro, 2016). Essas características reforçam o papel do Grupo Bambuí no desenvolvimento de estratégias agrícolas mais sustentáveis, promovendo o uso de recursos locais.

Outro aspecto relevante diz respeito à ocorrência de biotita-xisto no Grupo Rio Preto, que se configura como um recurso estratégico principalmente devido à influência do custo do frete na viabilidade econômica dos remineralizadores. A proximidade dessas litologias às regiões agrícolas consumidoras pode reduzir significativamente os custos logísticos, tornando o material mais competitivo frente a outras fontes de nutrientes. Nesse contexto, a realização de mapeamentos geológicos mais detalhados sobre essa unidade é essencial para aprimorar o conhecimento sobre sua distribuição espacial e seu potencial como fonte de remineralizadores potássico-cálcico-magnesianos, contribuindo para o fortalecimento da agricultura sustentável na região.

Comparação com outros estudos

Os resultados deste estudo acompanham a tendência da literatura em buscar fontes locais de nutrientes por meio do uso de rochas como remineralizadores. Assim como realizado aqui, outros trabalhos têm empregado bases públicas e geotecnologias para o mapeamento de áreas potenciais. Bem & Theodoro (2023), por exemplo, utilizaram o GeoSGB no estado do Pará e também identificaram limitações no nível de detalhamento da base para aplicações em escala local. Para superar esse desafio, os autores complementaram os dados com o Mapa de Geodiversidade do Pará (João et al., 2013) e informações da literatura, reforçando a necessidade de integrar diferentes fontes de informação no processo de zoneamento agromineral.

Além das considerações metodológicas, diversos trabalhos têm destacado a importância de se avaliar não apenas o teor total de nutrientes nos minerais, mas também a fração efetivamente

biodisponível no solo. Krah et al. (2022), por exemplo, aplicaram técnicas de microsonda eletrônica (EPMA) em amostras de biotita-xisto e biotita-sienito da região de Guanambi (BA), comprovando que a composição mineralógica exerce forte influência na reatividade das rochas. Nos experimentos conduzidos pelos autores, o biotita-xisto apresentou maior capacidade de liberação de nutrientes devido à formação de hidrobiotita, o que aumentou a capacidade de troca catiônica do material. Já o biotita-sienito apresentou menor reatividade, atribuída à elevada relação Fe/Mg nos sítios octaédricos, um fator mineralógico que restringe a liberação de potássio.

Estudos similares reforçam que o método de extração do nutriente também impacta diretamente os resultados. Araújo & Sampaio (2010) compararam diferentes métodos de extração de potássio em rochas alcalinas, demonstrando que os valores obtidos variam conforme o reagente utilizado. Essa variação evidencia a necessidade de escolher metodologias analíticas compatíveis com a realidade agrícola e com o comportamento das rochas no ambiente edáfico. Já Angélica et al. (2014) observaram, em perfis de alteração de rochas sieníticas, que o intemperismo reduz o teor total de potássio presente na microclina, porém aumenta a disponibilidade do nutriente para o solo, revelando a importância dos processos pedogenéticos na transformação dos minerais. Esses resultados vão ao encontro das análises de Braga et al. (2014), que ao avaliar a aplicação agrícola de sienito em experimentos com milho, identificaram que a eficiência do remineralizador depende tanto do teor total de nutrientes quanto da dinâmica de liberação no ambiente agrícola.

Outro aspecto discutido na literatura diz respeito ao comportamento agrônomo das rochas em diferentes tipos de solo e condições edafoclimáticas. Castro et al. (2022), ao estudarem micaxistos de Bela Vista de Goiás (GO), verificaram que o desempenho do remineralizador é variável conforme a textura do solo. Em solos arenosos, o micaxisto apresentou resultados superiores aos do KCl no cultivo de milho, enquanto em solos argilosos, doses maiores do material foram necessárias para obter desempenho similar, principalmente no primeiro ano de cultivo. Esses dados sugerem que o pó de rocha pode substituir parcialmente os fertilizantes convencionais, dependendo do manejo e das condições locais.

A granulometria também é um fator determinante na eficiência do remineralizador, como demonstrado por Krah et al. (2022). Em seus estudos com biotita-xisto da região de Guanambi (BA), os autores observaram variações expressivas nos teores de nutrientes em função do tamanho das partículas. O

teor de K_2O variou de 2,38% na fração de 300–1000 μm para 4,14% na fração de 53–300 μm , enquanto o MgO apresentou variação de 2,38% a 3,84%, evidenciando que partículas mais finas tendem a disponibilizar maior quantidade de nutrientes, embora isso possa implicar em custos operacionais adicionais no beneficiamento do material.

Os dados obtidos neste estudo com o biotita-xisto do Grupo Rio Preto corroboram essas tendências. Os teores de K_2O e MgO disponíveis superaram os valores mínimos estabelecidos para certificação de remineralizadores, indicando potencial de aplicação agrícola, especialmente quando considerados os custos logísticos reduzidos devido à proximidade das jazidas com as áreas agrícolas. Ainda assim, a variabilidade observada na literatura em função da granulometria, tipo de solo e composição mineralógica reforça a necessidade de realizar ensaios agrônômicos complementares, que considerem essas variáveis em diferentes sistemas de cultivo da região oeste da Bahia.

Essas futuras análises permitirão otimizar o uso do biotita-xisto como remineralizador, ajustando sua aplicação às condições específicas de solo e cultura, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e alinhadas à realidade edafoclimática e econômica regional.

Possibilidades de aplicação

As características observadas nas rochas analisadas indicam seu potencial de aplicação agrícola, tanto como fontes alternativas de nutrientes quanto como insumos complementares em programas de correção e remineralização de solos.

O biotita-xisto se destaca por conter concentrações relevantes de potássio, magnésio e cálcio, atendendo aos parâmetros usualmente exigidos para rochas potássicas em uso agrícola. Os teores encontrados superam com folga os valores mínimos praticados para esse tipo de insumo, reforçando sua viabilidade como fonte multinutriente. Além da composição favorável, o material apresenta baixos teores de elementos potencialmente tóxicos, o que contribui para sua segurança ambiental.

Já o carbonatito apresenta elevada concentração de cálcio e fósforo, com destaque para a presença de fluorapatita como principal mineral portador de fósforo. Embora não seja expressivo em potássio, a possibilidade de uso em conjunto com outras rochas potássicas — como o próprio biotita-xisto — amplia suas possibilidades de aplicação, especialmente em sistemas agrícolas que demandem aportes múltiplos de nutrientes. O comportamento agrônômico do material é compatível com o que se espera de rochas do subgrupo fósforo-cálcico, podendo atuar tanto como remineralizador quanto como corretivo de acidez.

Outro aspecto relevante diz respeito à logística de uso, especialmente no caso do biotita-xisto. As ocorrências identificadas no Grupo Rio Preto, situadas no município de Formosa do Rio Preto (BA) — uma das principais regiões agrícolas do estado — favorecem a adoção local do insumo, reduzindo custos de transporte e facilitando a inserção do material em cadeias produtivas já consolidadas. Essa vantagem estratégica amplia as

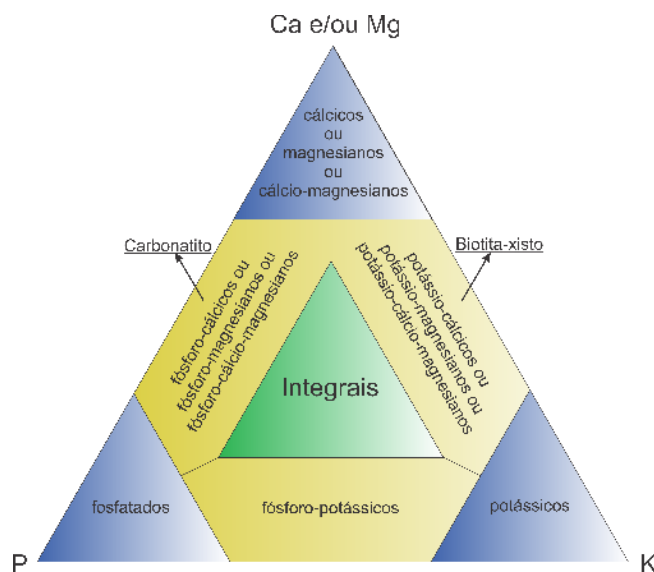


Figura 12 - Diagrama ternário PKCa-Mg representando os grupos e subgrupos dos remineralizadores, com base nos macronutrientes primários (P e K) e secundários (Ca e Mg). Os integrais, localizados no centro do diagrama, apresentam concentrações elevadas desses nutrientes. Fonte: Modificado de Côrrea e Oliveira (2024).

Tabela 6 - Comparação dos teores de K₂O, K disponível, MgO e CaO do biotita-xisto estudado com dados de pesquisas publicadas que analisaram o mesmo resíduo e diferentes rochas em pó.

Fonte	Amostra	K ₂ O (%)	K disponível (mg/L; mg/kg)	MgO (%)	CaO (%)
Este estudo	Biotita-xisto	6,32	4,70	7,71	4,21
Braga et al. (2023)	Resíduo	6,96	192,76	0,92	7,72
Nasser et al. (2022)	Resíduo	3,5	-	2,34	3,36
Lichs et al. (2019)	Resíduo	4,29	-	-	17,09
Castro et al. (2022)	Mica-xisto	3,47	-	3,87	2,09
Souza (2021)	Piroxenito-bebedourito	1,09	-	7,42	30,24
Duarte et al. (2013)	Olivina Melilitito	3,42	30,7	18,44	13,35
Duarte et al. (2013)	Granito	3,99	29,7	0,49	1,81
Duarte et al. (2013)	Sienito	4,7	25	-	-
Araújo e Sampaio (2010)	Rocha potássica alcalina	8,9	58,9	0,29	0,14
Angélica et al. (2014)	Sienito (saprólito)	13	43,01	-	-
Braga et al. (2014a)	Sienito	12,5	172,04	-	-

chances de aproveitamento do remineralizador na própria região onde é extraído, promovendo o uso racional dos recursos minerais e incentivando práticas agrícolas mais sustentáveis e regionalizadas.

A integração entre composição favorável, segurança ambiental e viabilidade logística torna esses materiais alternativas reais à substituição parcial dos fertilizantes convencionais, contribuindo para a diversificação da matriz de insumos e para a valorização do potencial agromineral regional.

Conclusões

- O Chapadão Urucua e seu entorno apresentam potencial relevante para a exploração de remineralizadores de solo, com destaque para duas áreas principais identificadas neste estudo: o Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias (BA), como fonte de fósforo, e o Grupo Rio Preto, pela disponibilidade de potássio.
- A elaboração de mapas temáticos sobre o grau de reatividade das rochas demonstrou-se uma ferramenta eficaz na identificação de novas áreas com potencial agrícola. A distribuição espacial e o nível de reatividade dos agrominerais fornecem informações estratégicas para orientar a exploração e o uso desses recursos.
- Os resultados laboratoriais reforçam a viabilidade técnica dos materiais analisados. O biotita-xisto apresentou concentrações de K₂O (6,32%), MgO (7,71%) e CaO (4,21%) compatíveis com os níveis exigidos para a certificação de remineralizadores de solo. Já o carbonatito, com 10,8% de P₂O₅ e 12,9% de CaO, destaca-se como uma fonte fosfocálcica de interesse, com potencial aplicação tanto como remineralizador quanto como corretivo, especialmente em sistemas agrícolas que demandam a reposição simultânea desses nutrientes.
- Fatores logísticos e econômicos também devem ser cuidadosamente considerados. A proximidade das áreas fontes com as zonas de cultivo torna-se um diferencial estratégico, especialmente quando se trata de remineralizadores, cujo volume de aplicação é significativamente superior ao dos fertilizantes químicos convencionais. Nesse contexto, a logística de transporte passa a ser um componente determinante da viabilidade econômica desses insumos, influenciando diretamente sua competitividade no mercado agrícola.
- Cabe destacar que os remineralizadores representam, além de uma alternativa nutricional, uma importante estratégia de segurança agrícola. Mesmo que atualmente sua utilização ainda seja considerada inviável, a disponibilidade regional desses insumos funciona como um “seguro estratégico” para os produtores locais. Situações externas, como crises geopolíticas ou oscilações no mercado internacional, podem provocar aumentos abruptos nos preços ou até a escassez dos fertilizantes químicos. Um exemplo recente foi o início da guerra entre Rússia e Ucrânia, quando se chegou a temer a falta de fertilizantes no mercado global, independentemente do custo.
- Diante desse contexto, o fortalecimento da cadeia de remineralizadores pode garantir autonomia e resiliência ao setor agrícola do oeste baiano, mitigando riscos associados à volatilidade do mercado internacional e contribuindo para práticas mais sustentáveis.
- Por fim, recomenda-se que estudos futuros realizem ensaios agronômicos em campo, avaliando a eficiência dos materiais em diferentes tipos de solo, culturas e sistemas de manejo. Essa etapa será fundamental para ajustar doses, métodos de aplicação e confirmar a viabilidade dos remineralizadores sob condições reais de cultivo, respeitando as particularidades edafoclimáticas da região.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), que concedeu uma bolsa a Leonardo de Matos Araujo. Os autores agradecem ao Centro de Pesquisa Professor Manuel Teixeira da Costa (CPMTC) da UFMG pelo suporte na realização da análise de DRX.

Referências

- Ackroyd, B., Guzman, C., & Chow, W. (2014). *Pre-feasibility study: Cerrado Verde ThermoPotash Project, Minas Gerais State, Brazil* (131 p.). [Relatório técnico]. Recuperado de <http://www.verdepotash.com>
- AIBA. (2024). *Circular nº 04 de 04/11/2024: Safra 2024/25 e condições climáticas no Oeste da Bahia*. Recuperado de <https://aiba.org.br/arquivos/boletins/Circular%2004%20de%2004-11-2024.pdf>
- Alkmim, F. F., & Martins-Neto, M. A. (2012). Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil.

- Marine and Petroleum Geology*, 33, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>
- ANDA. (2025). *Principais indicadores do setor de fertilizantes*. Recuperado de <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1174006/1/CPAC-AA-Giuliano-Marchi.pdf>
- Angélica, R. S., Leite, A. A. S., Braga, F. C. S., Oliveira, M. A. O., Oliveira, K. S., & Martins, E. S. (2014). Feldspar crystallinity and potassium behaviour in soils overlying syenites: Agromineral application. In *16th World Fertilizer Congress of CIEC* (pp. 161–163). Rio de Janeiro, Brazil. Recuperado de <http://ainfo.cnptia.embrapa.br>
- Araújo, S. C., & Sampaio, J. A. (2010). Estudo do uso de rocha potássica como fertilizante de liberação lenta. In A. B. Luz, C. A. M. Baltar, & L. C. Bertolino (Orgs.), *II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste: Anais* (pp. 145–152). Campina Grande, Brazil: CETEM. Recuperado de <http://mineralis.cetem.gov.br>
- Barbosa, N. S. (2016). *Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia, Bahia* [Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia].
- Bem, L. P., & Theodoro, S. H. (2023). Ocorrências de rochas com potencial para o uso como remineralizadores de solo nas mesorregiões Nordeste e Sudeste do Pará. Recuperado de <https://gmga.com.br/01-ocorrencias-de-rochas-com-potencial-para-ouso-como-remineralizadores-de-solo-nas-mesorregioes-nordeste-e-sudeste-do-para/>
- Braga, F. C. S., Leite, A. A. S., Angélica, R. S., Martins, E. S., Oliveira, M. I. L., & Wender, I. G. (2014). K-alternative fertilizer project: Ultrapotassic syenite deposit in Pernambuco state. In *16th World Fertilizer Congress of CIEC* (pp. 167–169). Rio de Janeiro, Brazil. Recuperado de <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1008428/1/S1874.pdf>
- Brasil. (2013). Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Brasília, DF: Presidência da República.
- Brod, E. R., & Blaskowski, A. E. (2024). *Avaliação do potencial agromineral do Brasil – Área: Estado do Tocantins* (Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para Agricultura, nº 30). Brasília: Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM.
- Buss, W., Hassemer, H., Ferguson, S., & Borevitz, J. (2024). Stabilisation of soil organic matter with rock dust partially counteracted by plants. *Global Change Biology*, 30(1), e17052. <https://doi.org/10.1111/gcb.17052>
- Castro, J. P. V., Leandro, W. M., Brail, E. P. F., Ferreira, K. R. S., Oliveira, C. B. A., & Passos, P. B. (2022). Eficiência agrônômica de remineralizados de solo de micaxisto na sucessão milheto-soja. *Research, Society and Development*, 11(14), e76111435864.
- Chiwona, A. G., Cortés, J. A., Gaulton, R. G., & Manning, D. A. C. (2020). Petrology and geochemistry of selected nepheline syenites from Malawi and their potential as alternative potash sources. *Journal of African Earth Sciences*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103807>
- Corrêa, R. S., & Oliveira, C. G. (2024). Classificação dos remineralizadores. *Geologia USP - Série Científica*, 24(2), 23–37. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v24-222452>
- Costa, F. G., & Oliveira, F. A. D. (1970). O 'Verdete' rocha potássica na região de Cedro do Abaeté. In *XXIV Congresso de Geologia*. Brasília, Brazil: Sociedade Brasileira de Geologia. Publicações, pp. 115–116.
- Donagemma, G. K., Fontana, A., Calderano, S. B., Teixeira, W. S. G., Amaral, A. J., Vieira, S. R., Morais, L. A., Mendonça-Santos, M. L., Aglio, M. L. D., Guilherme, L. R., Mafra, A. L., Benedetti, A. S., Coelho, M. R., Mattos, E. R., Almeida, J. A., & Viana, J. H. M. (2016). Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1003–1020. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>
- Duarte, W. M., Mafra, A. L., Foresti, M. M., Piccolla, C. D., & Almeida, J. A. (2013). Potencial de olivina melilitito, granito e sienito na disponibilização de potássio em solos. *Revista de Ciências Agroveterinária*, 12(1), 68–77. Recuperado de <https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/5200>
- Embrapa. (2020). Solos arenosos: A nova fronteira agrícola brasileira. Recuperado de <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/49801116/artigo---solos-arenosos-a-nova-fronteira-agricola-brasileira>
- FAOSTAT. (2023). *Statistical yearbook – World food and agriculture* (384 p.). Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e04f2b4-82fc-4740-8cd5-9b66f5335239/content>
- Faria Júnior, L. E. C. (1979). *Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano – Bacia do Maranhão*

- [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará].
- Fuck, R. A. A. (1994). Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In *38º Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 215–216). Balneário Camboriú, Brazil: SBG.
- Glorieux, J., & Delmelle, P. (2022). Assessing the potential of enhanced silicate weathering in a tropical soil to remove atmospheric CO₂ and improve soil fertility: A modeling study. [Tese de mestrado, Université Catholique de Louvain].
<http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:38227>
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- João, X. S. J., Teixeira, S. G., & Fonseca, D. D. F. (2013). *Geodiversidade do Estado do Pará*. Belém: CPRM.
- Lasaga, A. C., Soler, J. M., Ganor, J., Burch, T. E., & Nagy, K. L. (1994). Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(10), 2361–2386.
- Li, J., & Heap, A. D. (2008). *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists* (137 p.). Canberra: Geoscience Australia. (Geoscience Australia Record, 2008/23).
- Lichts, T., Sander, A., Caraméz, M. G. S., Daubermann, B. B., Decker, J. T., & Modolo, R. C. E. (2019). Utilização de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais de uma marmoraria de São Leopoldo com a finalidade de remineralização de solos. In *XI Simpósio Sul-brasileiro de Geologia* (p. 278). Bento Gonçalves, Brazil: SBG-Núcleo Sul. Recuperado de [http://sbgeo.org.br/assets/admin/imgCk/files/Anais/ANAIS-XVIISNET-XISSBG-2019\(1\).pdf](http://sbgeo.org.br/assets/admin/imgCk/files/Anais/ANAIS-XVIISNET-XISSBG-2019(1).pdf)
- Krahl, L. L., Marchi, G., Paz, S. P. A., Angélica, R. S., Sousa-Silva, J. C., Valadares, L. F., & Martins, E. S. (2022). Increase in cation exchange capacity by the action of maize rhizosphere on Mg or Fe biotite-rich rocks. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72376.
- Machado, R. V., Ribeiro, R. C. C., & Andrade, F. V. (2008). Nutrição mineral e a utilização de resíduos de rochas ornamentais. In *XVII Jornada de Iniciação Científica* (pp. 130–136). Vitória: UFES-CETEM. Recuperado de <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/490>
- Magalhães, L. A., Martins, É. S., Bergmann, M., Blaskowski, A. E., Sander, A., & Fioravanti, T. N. (2024). *Mapas prospectivos de ocorrência potencial de agrominerais silicáticos no Brasil* (Comunicado Técnico 38). Embrapa Territorial.
<https://www.embrapa.br/territorial>
- Manning, D. A. C., Baptista, J., Limon, M. S., & Brandt, K. (2017). Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the Total Environment*, 574, 476–481.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.086>
- Manning, D. A. C., & Theodoro, S. H. (2020). Enabling food security through use of local rocks and minerals. *The Extractive Industries and Society*, 7, 480–487.
- Martins, E. S., Oliveira, C. G., & Resende, A. V. (2008). Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In A. B. Luz & F. M. Lins (Eds.), *Rochas e minerais industriais* (2ª ed., pp. 206–211). Rio de Janeiro: CETEM.
- Martins, E. S., Resende, A. V., Oliveira, C. G., & Furtini Neto, A. E. (2010). Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In F. R. C. Fernandes, A. B. Luz, & Z. C. Castilhos (Eds.), *Agrominerais para o Brasil* (pp. 89–104). Rio de Janeiro: CETEM.
- Martins, E. S., Couto Júnior, A. F., & Vasconcelos, V. (2017). Zoneamento agrogeológico como ferramenta para o manejo regional da fertilidade de solos agrícolas tropicais. In *3º Congresso Brasileiro de Rochagem* (pp. 91–100). Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Cerrados; Assis: Triunfal Gráfica e Editora.
- Martins, É. S., Martins, E. S., & Hardoim, P. R. (2023). Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. *Informe Agropecuário*, 44(321), 26–39.
- Misi, A., & Kyle, R. (1994). Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, A64(2), 299–310.
- Moreira, D. S. (2015). *Estratigrafia, petrografia e gênese da mineralização de potássio em siltitos verdes (verdetes) do Grupo Bambuí na região de São Gotardo, Minas Gerais* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais].
- Moura, C. A. V., Pinto, C. P., Silva, M. G., & Rocha Neto, M. B. (2008). Geocronologia e geoquímica isotópica Sm-Nd da Faixa

- Araguaia. In *44º Congresso Brasileiro de Geologia* (p. 28). Curitiba, Brazil: SBG.
- Mrojiniski, F., Santos, C. C., Corioletti, N. S. D., & Silva, V. L. (2020). Manejo nutricional da cultura do algodoeiro em solos do Cerrado mato-grossense. *Scientific Electronic Archives*, 13(9), 137–140. <https://doi.org/10.36560/13920201032>
- Nasser, M. D., Guarçoni, A., Carneiro, V. A., Burket, D., & Tavares, M. B. (2022). Caracterização química do resíduo gerado por beneficiamento de rochas ornamentais do município de Adamantina (SP). *Cientific@ Multidisciplinary Journal*, 9(1), 1–7.
- OBahia – Inteligência Territorial e Hídrica para o Oeste da Bahia. (2024). Recuperado de <http://obahia.dea.ufv.br/maps/38/view>
- Palandri, J. L., & Kharaka, Y. K. (2004). *A compilation of rate parameters of water–mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling*. Denver: US Geological Survey.
- Paim, M. M. (2014). *Maciço de Cara Suja: Expressão do magmatismo alcalino potássico pós-colisional no Sudoeste da Bahia*. Salvador: [s.n.].
- Pimentel, M. M., Rodrigues, J. B., Dellagiustina, M. E. S., Junges, S. L., & Matteini, M. (2011). The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(4), 345–357.
- Prado, E. M. G., & Martins, E. de S. (2019). *Zoneamento agrogeológico do Brasil* [Apresentação de slides]. SGB/CPRM & Embrapa. Acesso em 20 de julho de 2025, de <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/1-zoneamento-agrogeologico-do-brasil-embrapa-e-cprm.pdf>
- Remedio, M. J. (2024). Potencial mineral de fontes de potássio e fosfato no Brasil. In Serviço Geológico do Brasil – CPRM. *Seminário Produção Nacional de Fertilizantes*. Recuperado de <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr3/eventos/seminarios/producao-nacional-de-fertilizantes>
- Rezende, E. S. (2021). *Faixa Rio Preto: atividade microbiológica, grafita e manganês no Neoproterozoico do Nordeste Brasileiro* [Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília].
- Ribeiro, P. S. E. (2016). *Projeto Minerações Associadas à Plataforma Bambuí no Sudeste do Estado do Tocantins (TO)*. Goiânia: CPRM.
- Sachs, L. L. B., Batista, I. H., & Abram, M. B. (2009). Rochas fosfáticas no estado do Piauí. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Sanches, A. L. (1997). *O fosforito proterozoico da região de Irecê (Bahia): Caracterização cristalográfica e química* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia].
- Sgarbi, G. N., Sgarbi, P. B., Campos, J. E., Dardenne, M. A., & Penha, U. C. (2001). Bacia Sanfranciscana: O registro fanerozóico da Bacia do São Francisco. In C. P. Pinto & M. A. Martins-Neto (Eds.), *Bacia do São Francisco: Geologia e recursos naturais* (pp. 93–138). Belo Horizonte: SBG Núcleo de Minas Gerais.
- Sousa, D. M. G., & Lobato, E. (1996). *Correção do solo e adubação da cultura da soja* (Circular Técnica nº 33). Planaltina: EMBRAPA-CPAC.
- Sousa, F. R. M., Freitas, M. S., & Virgens Neto, J. (Orgs.). (2017). *Geologia e recursos minerais das folhas Paranaguá (SC.23-Z-A-I); Rio Paraim (SC.23-Z-A-IV) e Mansidão (SC.23-Z-A-V): Estados do Piauí e Bahia*. Mapeamento Geológico, Escala 1:100.000. Repositório Institucional de Geociências - CPRM.
- Souza, F. N. S. (2014). *O potencial de agrominerais silicáticos como fonte de nutrientes na agricultura tropical* [Tese de doutorado, Universidade de Brasília].
- Souza, E. K. B. (2021). *Desempenho da rocha piroxenito-bebedourito como remineralizador de solos* [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Goiás]. Recuperado de https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/710/o/E_DIANA_KATJA_BERTOLDO_SOUZA.pdf
- Swoboda, P., Döring, T. F., & Hamer, M. (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, 807, 150976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>
- Toscani, R. G. S., & Campos, J. E. G. (2017). Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. *Geociências*, 36(2), 259–274.
- Uhlein, A., et al. (2012). Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*, 20(2), 1–13.
- Valarelli, J. V., Novais, R. F., Vaz de Melo, M. T., & Leal, E. D. (1993). Ardósias verdetes de Cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65, 343–375.

Viana, L. S. B., Caitano, T. B. S., & Pontes, A. N. (2021). A remineralização de solos como iniciativa ao desenvolvimento sustentável. *Research, Society and Development*, 10(14), e45101421516. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21516>

Young, C.G.K., (2006). *Estratigrafia de alta-resolução da Formação Pimenteiras (Devoniano, Bacia do Parnaíba)* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro]