



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Desvendando o potencial da rochagem com pó de rocha granítica de Capitão Poço, no Nordeste Paraense

Luanny Gabriele Cunha Ferreira¹, Jose Henrique Cattanio², José Guimarães Martins³

¹Doutoranda em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, R. Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, Pará. Luanny_cunha@yahoo.com (autor correspondente). ²Doutor, Professor Titular, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, R. Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, Pará. cattanio@ufpa.br. ³Geólogo, Rodovia PA-124, Fazenda Igarapé Grande, s/n, CEP 68650-000, Capitão Poço, Pará. J-guimaraes40@hotmail.com.

1 Luanny Ferreira DOI: <https://orcid.org/0000-0002-5019-4515>

2 Jose Cattanio DOI: <https://orcid.org/0000-0001-8335-9593>

3 José Martins DOI: <https://orcid.org/0009-0005-5683-2230>

Artigo recebido em 01/06/2024 e aceite em 30/06/2025

RESUMO

Na mesorregião do Nordeste Paraense, a baixa fertilidade do solo e os altos custos dos fertilizantes convencionais representam desafios significativos. A rochagem, que envolve a incorporação de rochas moídas ao solo, surge como uma alternativa sustentável. Este estudo concentrou-se na caracterização do pó de rocha granítica da Fazenda Igarapé Grande em Capitão Poço, Pará, conforme as regulamentações da Lei 12.890/2013 e da Instrução Normativa N° 05/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. A granulometria foi avaliada de acordo com as normas da ABNT NBR 181/2016 e o pH de abrasão pelo método de Grant. Foram realizadas análises da composição química, incluindo a soma de bases (CaO + MgO + K₂O), macronutrientes (P₂O₅) e micronutrientes (B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Si e Zn), através de Fluorescência de Raios-X. Elementos potencialmente tóxicos, como As, Cd e Pb, foram verificados com um Espectrômetro de Emissão Óptica, enquanto o Hg foi medido por um Analisador Direto de Mercúrio. A concentração de Sílica Livre foi avaliada por Petrografia em Microscópio Óptico. Os resultados mostraram que a amostra atendeu aos critérios para o macronutriente K₂O (6,02%) e para os Elementos Potencialmente Tóxicos, apresentando níveis aceitáveis de P₂O₅ (0,97%), Fe (1,17%) e Si (28,68%). A amostra também atendeu à especificação física "pó". No entanto, não cumpriu plenamente os parâmetros estabelecidos pela IN N° 05/2016 para ser classificada como remineralizador de solo. Mesmo assim, devido ao teor substancial de K₂O, este material é promissor para blendagem. Palavras-chave: remineralização, granito, amazônia, mineralogia.

Unlocking the potential of rock blasting with granite rock dust from Capitão Poço, in the northeast of Pará State

ABSTRACT

In the Northeast Para mesoregion, low soil fertility and the high costs of conventional fertilizers pose significant challenges. Rock cutting, which involves incorporating ground rock into the soil, has emerged as a sustainable alternative. This study focused on the characterization of granite rock dust from the Igarapé Grande Farm in Capitão Poço, Pará, in accordance with the regulations of Law 12.890/2013 and Normative Instruction N° 05/2016 of the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. Grain size was assessed in accordance with ABNT NBR 181/2016 standards and abrasion pH using the Grant method. The chemical composition was analyzed, including the sum of bases (CaO + MgO + K₂O), macronutrients (P₂O₅) and micronutrients (B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Si and Zn), using X-ray fluorescence. Potentially toxic elements such as As, Cd and Pb were checked using an Optical Emission Spectrometer, while Hg was measured using a Direct Mercury Analyzer. The concentration of free silica was assessed by optical microscope petrography. The results showed that the sample met the criteria for the macronutrient K₂O (6,02%) and for Potentially Toxic Elements, with acceptable levels of P₂O₅ (0,97%), Fe (1,17%) and Si (28,68%). The sample also met the "powder" physical specification. However, it did not fully comply with the parameters established by IN 05/2016 to be classified as a blended.

Keywords: remineralization, granite, amazon, mineralogy.

Introdução

A rochagem, prática agrícola ancestral, tem sido cada vez mais reconhecida como uma alternativa sustentável para a melhoria da fertilidade do solo e para redução da dependência de fertilizantes químicos. A técnica consiste na aplicação de rochas moídas, que, ao sofrerem intemperismo, liberam gradualmente nutrientes essenciais para as plantas, contribuindo para a sustentabilidade agrícola e no aumento da produtividade (Beltran, 2023). No entanto, a implementação dessa técnica enfrenta desafios, especialmente em regiões tropicais, como a Amazônia, onde os solos são frequentemente pobres em nutrientes devido à intensa lixiviação e ao alto grau de intemperismo (Schaefer et al., 2017).

No Nordeste Paraense, a agricultura e a pecuária desempenham papel fundamental na economia, porém são limitadas pela baixa fertilidade natural dos solos e pelos elevados custos dos fertilizantes químicos (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2020). Culturas perenes, como laranja e açaí, enfrentam uma alta demanda por fontes de nutrientes que se liberem de forma gradual, minimizando as perdas por lixiviação. Nesse contexto, surge a necessidade de alternativas que não só melhorem a fertilidade do solo, mas também ofereçam soluções mais econômicas e sustentáveis para os agricultores da região (Cirino et al., 2021).

A área possui características geológicas favoráveis, com vastas reservas de rochas silicáticas ricas em nutrientes, como o granito de Ourém, encontrado na Fazenda Igarapé Grande, no município de Capitão Poço (PA). Este material, devido à sua composição mineral, oferece uma fonte de nutrientes de liberação lenta, capaz de suprir as demandas das culturas locais, ao mesmo tempo em que reduz os custos com insumos importados e contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis. Tamfuh et al. (2022) destacaram que o pó de rocha granítica de Dschang, na África, proporcionou maior produtividade e custo-benefício em comparação ao pó de basalto e à adubação convencional (NPK). Segundo Kwekam (2020), a presença de magnetita nos granitos de Dschang é o que confere a esse material um diferencial em relação a outras fontes geominaerais voltadas para a fertilização de solos. Bamberg (2023) também corrobora com esses resultados, afirmando que a adição de monzogranito finamente moído aumentou a disponibilidade de potássio no solo, mantendo a produtividade durante duas safras de milho e trigo no Rio Grande do Sul.

Assim, a análise do pó de rocha granítica da Fazenda Igarapé Grande busca avaliar a viabilidade dessa alternativa, que, ao melhorar a fertilidade dos solos, pode representar uma resposta estratégica para os desafios enfrentados pela agricultura na região. O uso deste remineralizador local pode diminuir a dependência de fertilizantes químicos e contribuir para a sustentabilidade das práticas agrícolas, conforme estabelecido pela Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013 e a Instrução Normativa N° 05 de 10 de março de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Material e Métodos

Caracterização do agente remineralizador

A pedreira da Fazenda Igarapé Grande (FIG-PA) ocupa uma área de 22,0 hectares, está situada no município de Capitão Poço, na mesorregião do Nordeste Paraense, a 182 km de Belém (Figura 1). A formação geológica que abriga a pedreira FIG-PA está inserida no contexto do Cinturão Gurupi, com destaque para o Granito de Ourém como a principal unidade geológica (Palheta, 2001). De acordo com esse mesmo autor, essa massa rochosa se apresenta altamente intemperizada, fragilizando-se com facilidade. Sua coloração varia entre tons de cinza esbranquiçado e amarelado, exibindo uma granulação que varia de média a grossa. Sua composição engloba minerais como quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, muscovita e biotita. Os cristais de feldspato apresentam uma forma amendoada, enquanto os de quartzo ocasionalmente assumem uma forma estirada, todos eles circundados por minerais de mica dispostos em padrões sigmoides, delineando uma foliação milonítica. Ademais, o corpo rochoso é atravessado por veios de quartzo com dimensões centimétricas, os quais podem se dispor de maneira concordante ou discordante em relação à foliação existente (Palheta, 2001).

O arranjo litoestratigráfico da região (Figura 2) é bem estratificado e compreende uma diversidade de rochas enriquecidas em potássio, incluindo granito, monzogranito, sienogranito, muscovita-biotita, pegmatito, entre outras. Sendo que na área do estudo a formação rochosa é composta por biotita monzogranito, muscovita-biotita granodiorito, granito, nefelina sienito, pegmatito, muscovita-biotita monzogranito e de sienogranito.

Obtenção da amostra

Para análise físico-químicas foi coletada uma amostra de 7 cm³ do agente remineralizador (Figura 3 a e b) e cuidadosamente armazenada em um saco plástico de polietileno, garantindo a preservação durante o transporte até o laboratório de análises.

O laboratório escolhido para realizar as análises foi o da “startup Reminera”, situado no Polo Tecnológico e Criativo da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE.

Este laboratório é devidamente cadastrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e está habilitado para certificar a comercialização de insumos agrícolas em conformidade com a IN N° 05 de março de 2016.

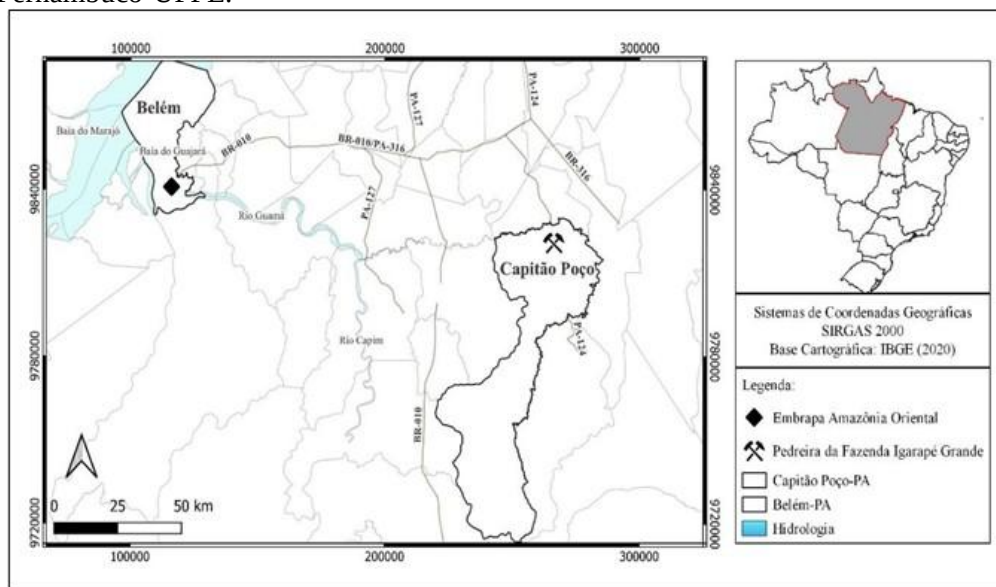


Figura 1. Mapa de localização e acesso principal ao município de Capitão Poço.

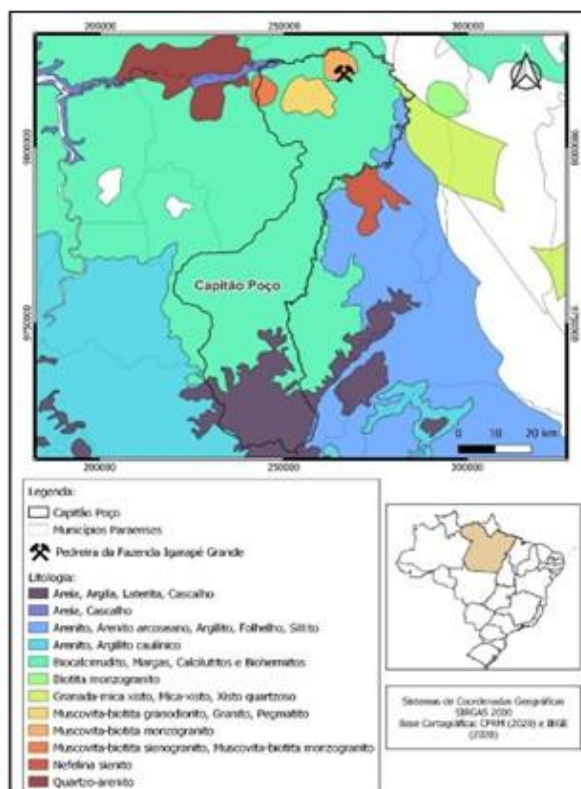


Figura 2. Litologia do município de Capitão Poço, Pará.

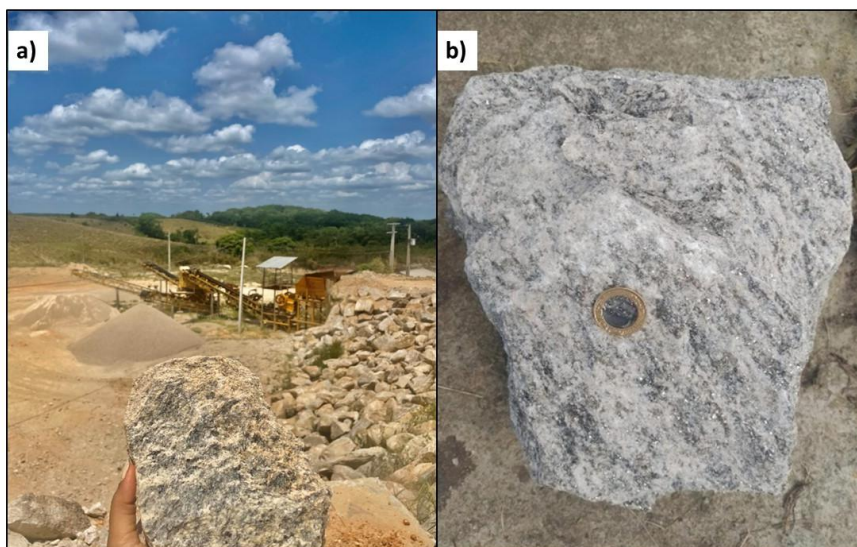


Figura 3. (a) Pedreira da FIG-PA, Capitão Poço-PA, onde é encontrado o agente remineralizador. (b) Amostra de 7 cm³ do agente remineralizador proveniente da pedreira FIG-PA enviada para análise mineralógica no laboratório Reminera, localizado no polo Tecnológico e Criativo da UFPE.

Análise mineralógica do material

A avaliação analítica foi conduzida em conformidade com as orientações estabelecidas pela Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013, que introduziu a categoria do uso de insumo mineral na agricultura, juntamente com sua regulamentação pela Instrução Normativa (IN) N° 5 de 10 de março de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Esta última norma estabelece as especificações e garantias dos produtos, proporcionando um quadro regulatório sólido para a análise. Dentre os requisitos a serem informados, e que foram alvo desta análise, estão: (i) a granulometria; (ii) a soma de bases óxido de potássio (K₂O), óxido de magnésio (MgO) e óxido de cálcio (CaO) a qual deve ser igual ou superior a 9%; (iii) o teor de K₂O deve ter um mínimo de 1%; (iv) o pH de abrasão; (v) micronutrientes e/ou fósforo podem ser declarados caso apresentem teores iguais ou superiores aos indicados no Anexo II da IN; (vi) a proporção de SiO₂ (sílica livre-quartzo) deve ser de até 25%; (vii) metais pesados como arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) devem ser declarados caso alcancem valores superiores a 15 ppm, 10 ppm, 0,1 ppm e 200 ppm, respectivamente.

Especificação da natureza física granulométrica

A especificação da natureza física da amostra para análise está de acordo com a ABNT NBR7181 de 09/2016, a qual exige a passagem da amostra por diferentes peneiras, como a peneira: n° 4 (4,8 mm), n° 7 (2,80 mm), n° 10 (2,00 mm), n° 20 (0,84 mm) e a de n° 50 (0,30 mm). Para a

validação da granulometria de 2,80 mm (ABNT n° 8), foi utilizado a peneira de 2,36 mm (ABNT n° 7), sem prejuízo quanto à avaliação da respectiva garantia granulométrica, de acordo com o laboratório de análise.

pH de abrasão

Para conduzir a análise do pH de abrasão da amostra, utilizou-se o medidor de pH de bolso AKSO AK-90 (com resolução de 0,1 e exatidão de $\pm 0,1$). O procedimento seguiu o método proposto por Grant (1969), no qual foi realizada a pesagem de 20 g de rocha moída (de amostra quarteada) em balança de precisão e em seguida transferida para um almofariz feito de ágata que foi previamente lavado com água deionizada e devidamente seco. Posteriormente, foi adicionado 40 ml de água deionizada na amostra e realizada a abrasão manual com pilão de ágata por 2 minutos. Após, aguardou-se a deposição do conteúdo suspenso por 2 minutos e, por fim, extraiu-se 15 ml do conteúdo sobrenadante com seringa esterilizada e mediu-se o pH de abrasão na lama residual.

Geoquímica

A presença e a concentração da soma de bases (CaO + MgO + K₂O), o macronutriente P₂O₅ e os micronutrientes boro (B), cloro (Cl), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), selênio (Se), silício (Si) e zinco (Zn), foram definidas pelo método da Fluorescência de Raios-X. Primeiramente, a amostra triturada foi submetida a uma secagem cuidadosa em uma estufa, mantida a uma

temperatura constante de 110 °C. Em seguida, uma porção da amostra seca foi triturada em uma cápsula de alumínio, utilizando uma força de 30 toneladas. Posteriormente, a pastilha resultante desse processo de compressão foi submetida à análise no espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo *ZSX Primus II* calibrado, o qual estava equipado com um tubo de ródio (Rh) e sete cristais analisadores.

O equipamento passou por uma calibração, utilizando o método empírico conhecido como curva de calibração. Nesse procedimento, foi observada a relação entre a intensidade dos raios-X e a concentração obtida a partir de amostras de padrões internos, que já possuíam concentrações conhecidas. A partir dessa curva de calibração, foi possível determinar a concentração de um componente químico em uma amostra desconhecida. Além disso, a intensidade dos raios-X foi relacionada com a espessura da quantidade da amostra a ser analisada.

As concentrações dos elementos tóxicos As, Cd e Pb foram determinadas utilizando um Espectrômetro de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (método 6010B do *US EPA*). Antes da análise, a amostra passou por um processo de digestão por micro-ondas (método 3051 do *US EPA*). A identificação qualitativa dos elementos foi realizada através da detecção das linhas de emissão características de cada elemento de interesse. Para garantir a confirmação da presença, geralmente foram consideradas pelo menos três linhas de emissão. A quantificação dos elementos desconhecidos foi obtida comparando os sinais dos íons com os sinais de curvas analíticas ou padrões de referência. As curvas analíticas abrangiam múltiplos elementos e podiam atingir uma faixa de trabalho linear de até seis ordens de grandeza. É importante mencionar que a perda de linearidade em concentrações elevadas ocorreu devido a processos de auto absorção.

Para determinar a concentração de Hg, utilizou-se o método de detecção direta por meio do Analisador Direto de Mercúrio (DMA80 - *US EPA Method 7473-3*). O procedimento consistiu em inserir a amostra no forno, onde ocorreu um aquecimento controlado para secagem e subsequente decomposição da matriz da amostra. O mercúrio presente na amostra foi transportado por um fluxo de oxigênio até um catalisador, onde todos os íons de mercúrio (Hg^+ e Hg^{2+}) foram

convertidos em óxido mercúrio (HgO). A seguir, o Hg foi seletivamente capturado pela amálgama de ouro, enquanto os demais compostos da amostra foram eliminados por meio de um fluxo contínuo de ar. Posteriormente, o amalgamador foi aquecido para liberar o Hg retido, que foi direcionado para as células, onde passou pelo feixe de medição, com a absorbância sendo medida a 253,7 nm.

Petrografia

Para realizar a descrição petrográfica, uma seção delgada da rocha, medindo 5,5 x 2,5 cm, foi confeccionada por meio do método de impregnação com resina. A análise da seção delgada foi conduzida utilizando um microscópio petrográfico *Zeiss Scope A1*. Para obter a porcentagem de sílica livre, uma análise modal foi realizada, envolvendo a contagem de 1000 pontos que foram uniformemente distribuídos com o auxílio de um *charriot* de passo acoplado ao microscópio.

Resultados e Discussão

Mineralogia

Os resultados revelaram valores declaráveis para alguns macro e micronutrientes, conforme IN N° 05 de 10 de março de 2016 (Tabela 1). Destaca-se, o teor de K_2O , atingindo 6,02%, e o de P_2O_5 , que foi registrado uma concentração de 0,97% na amostra analisada. Em um estudo conduzido por Silva-Hermo et al. (2013), que utilizou pó de rocha granítica originário da Galiza, no Noroeste da Espanha, observou-se um notável aumento nos níveis de potássio no solo durante um experimento de cultivo em casa de vegetação com *Azevém Italiano* (*Lolium multiflorum*). No entanto, é importante ressaltar que os teores de CaO (0,74%) e MgO (0,64%) não alcançaram os valores considerados declaráveis. Conforme indicado por Khan e Rana (2020), quando os resultados da análise mineralógica revelam baixas concentrações de Ca e Mg, torna-se necessário considerar a inclusão de diferentes fontes desses nutrientes. Isso pode ser alcançado por meio da adição de fertilizantes como cal, gesso e enxofre, ou pela mistura com outro pó de rocha que contenha predominantemente macronutrientes de Ca e Mg.

Tabela 1. Comparação dos valores de macro e micronutrientes, bem como da soma de bases (SB), identificados por análise mineralógica laboratorial do pó de rocha granítica de Capitão Poço-PA (FIG-PA), em relação ao pó de rocha granítica de Ibirama-SC (IBIRA-SC) conforme Duarte et al. (2013); Galiza, Nordeste da Espanha (GAL-ESP) segundo Silva et al. (2013); e Potiraguá-BA (POT-BA) conforme Piza et al. (2010).

Amostra	K ₂ O	CaO	MgO	SB	P ₂ O ₅	Fe	Si	Mn	Zn
	%								
FIG-PA	6,02	0,74	0,64	7,40	0,97	1,17	26,68	0,01	0,008
IBIRA-SC	3,99	1,81	0,49	6,29	0,14	2,81	*	0,04	*
GAL-ESP	4,30	3,80	1,60	9,70	*	*	*	*	*
POT-BA	6,90	0,86	0,02	7,78	0,001	*	*	0,02	*

Legenda: **em negrito**: valores declaráveis e de acordo com a IN N° 05/2016, do MAPA; (*): valores não avaliados mineralogicamente por Duarte et al. (2013).

A soma de bases (SB; K₂O, CaO e MgO), que fornece informações sobre a quantidade total de bases presentes na rocha e sua capacidade de fornecer nutrientes ao solo, encontrou-se em uma concentração de 7,40 % da amostra analisada, estando abaixo da garantia de 9,00 % e de sua tolerância (8,10 %), de acordo com IN N° 05 de 10 de março de 2016. Bem e Theodoro (2023) afirmaram que o Nordeste Paraense destaca-se como uma região com grande potencial para a produção de *blends*, técnica que consiste na mistura de rochas que estejam em conformidade com a IN N° 05 de 10 de março de 2016. Nesse contexto, diversos estudos foram conduzidos na mesorregião do nordeste paraense, interior do Cinturão Gurupi, com o objetivo de investigar sua potencialidade mineralógica. A exemplo de Klein e Lopes (2011) identificaram uma elevada SB de 13,39% na formação *Chega Tudo*, situada entre os estados do Maranhão e Pará, a qual foi caracterizada como sendo uma sequência Metavulcano-Sedimentar. Da mesma forma, o estudo de Klein et al. (2002) revelou uma concentração de SB de 9,93% no Grupo Aurizona, que também apresenta uma sequência Metavulcano-Sedimentar.

Dentre os micronutrientes essenciais para o crescimento sadio das plantas, destacou-se o Mn (0,01%) e o Zn (0,008%), porém não atenderam aos critérios de declarabilidade estabelecidos pela IN N° 05 de 10 de março de 2016. Em contrapartida, os teores dos micronutrientes Fe (1,17%) e Si (26,68%) foram não apenas identificados, mas também declarados, conforme os parâmetros estabelecidos pela referida norma.

Com o objetivo de comparar e verificar a potencialidade mineralógica do pó de rocha granítica FIG-PA em relação a outras rochas graníticas, foram analisados os pós de rocha provenientes de Lages-SC (Duarte et al., 2013), Potiraguá-BA (Piza et al., 2010) e Galiza no Nordeste da Espanha (Silva et al., 2013) (Tabela 1).

Desta maneira, foi observado que a FIG-PA apresenta uma concentração de 0,64% maior de MgO em comparação com as outras rochas graníticas. Além disso, destacou-se por possuir um valor expressivo de K₂O, sendo que dos resultados da literatura analisados, apenas o pó de rocha de Potiraguá-BA apresentou valor superior, com 6,90%. A soma de bases da maioria das amostras comparadas não atingiu o limite estabelecido pela IN N° 05 de 10 de março de 2016. Um diferencial significativo é a elevada concentração de P₂O₅ (0,97%), o que reforça a potencialidade mineralógica de FIG-PA. Conforme Barros e Ribeiro (2021), os rejeitos de granito são ricos em potássio, que é liberado gradualmente no solo, contribuindo para o aumento do pH.

Em relação aos elementos potencialmente tóxicos, todos estão em estrita conformidade com as diretrizes estabelecidas pela IN N° 05/2016, sendo suas concentrações (Tabela 2), abaixo dos valores limites estipulados na IN N° 05/2016, do MAPA. Desta forma se assegura que não há riscos de contaminação do solo, nem prejuízos à absorção destes nutrientes pelas plantas, preservando assim a produção agrícola saudável (Gasparotto & Martinello, 2021). Entretanto, é digno de nota que Klein et al. (2002) identificaram no nordeste paraense rochas xistosas do Grupo Amazonas com concentrações elevadas de arsênio, em torno de 1000 ppm, provenientes de uma zona mineralizada incorporada por sulfetos, o que as coloca em desacordo com a IN N° 05 de 10 de março de 2016. Em contrapartida, um estudo conduzido por Stocker et al. (2016) avaliou o impacto do pó de rocha de xisto retornado, subproduto da extração de hidrocarbonetos, em um solo Argissolo Vermelho Distrófico arenoso, não evidenciando aumento de toxicidade no solo após a aplicação desse material.

Tabela 2. Valores identificados pela análise mineralógica em laboratório, em relação aos elementos potencialmente tóxicos do pó de rocha granítico FIG-PA.

Amostra	As	Cd	Hg	Pb
	ppm			
FIG-PA	<1	<0,1	<0,025	2,5

*em negrito: valores declaráveis e de acordo com a IN N° 05/2016, do MAPA.

O pH de abrasão, usado para avaliar a capacidade de uma rocha resistir à desagregação e à liberação de seus componentes quando submetida à abrasão, é crucial para entender sua interação com o solo. Nesse contexto, o valor registrado foi de 8,8, o que está acima do limite desejado para fins de rochagem ($\geq 7,0$), dificultando assim a liberação dos nutrientes presentes do material geológico.

Natureza física granulométrica

A especificação da natureza física desempenha um papel crucial, pois influencia diretamente na reatividade das partículas minerais frente aos agentes físicos, químicos e biológicos. Quanto menor a granulometria de um mineral, maior a área de superfície disponível para interações, resultando em uma taxa de intemperismo mais elevada (Theodoro et al., 2010). De acordo com Silveira et al. (2016) quando se trata de corretivos de acidez, as partículas que têm tamanhos entre 2,00 mm e 0,84 mm necessitam de um período de tempo superior a 60 meses para alcançar uma reação de intemperismo completa. No contexto apresentado, o pó de rocha granítica da FIG-PA revelou resultados específicos de granulometria da seguinte forma: 98,55% das partículas passaram pela peneira de 4,75 mm (ABNT n°4); 85,23% atravessaram a peneira de 2,36 mm (ABNT n°8); e 96,96% das partículas passaram pela peneira de 2,00 mm (ABNT n°10); 71,04% passaram pela peneira de 0,84 mm (ABNT n°20); e apenas 64,59% passaram pela peneira de 0,30 mm (ABNT n°50). No entanto, é crucial ressaltar que a amostra não atendeu aos requisitos granulométricos necessários para ser classificada como "filler", uma vez que não alcançou 100% de seu material passando pela peneira de 0,30 mm. Portanto, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela IN N° 05 de 10 de março de 2016, o material em questão foi categorizado como "pó". Para uso na agricultura será necessário pulverizar melhor as amostras a fim de que a granulometria atenda as especificações da normativa.

Diante desse cenário, Swoboda et al. (2021) destacam a importância de soluções que

acelerem o intemperismo da rocha, visando aumentar a taxa de liberação de nutrientes, através de tratamentos químicos, biológicos e físicos. Nesse contexto, Ávila e Corrêa (2024) evidenciaram que o uso do pó de rocha granítica Valsunga, em Santa Catarina, após tratamento térmico por calcinação, resultou em um aumento significativo na disponibilidade de potássio para a agricultura.

Petrografia/ Sílica livre

A análise da rocha coletada na FIG-PA revelou características típicas de uma rocha ígnea plutônica, identificada como granito a duas micas, com presença significativa de apatita. Pesquisas, como realizada por Gomes (2021), destacam o elevado potencial do pó de rocha granítica como insumo agrícola, comprovado por sua eficiência, que só perde para o basalto, ao proporcionar um incremento expressivo de 4.714 kg/ha na produtividade da soja, o que reforça sua importância estratégica para culturas de alta produtividade.

Em aspectos gerais, a rocha FIG-PA foi definida como inequigranular, com granulação variando de fina a média. Sendo identificado a presença de uma foliação incipiente, cuja definição se baseou na orientação das lamelas de mica na matriz da rocha. No que diz respeito à alteração mineral, a amostra exibiu uma gama de condições. Em geral, a alteração intempérica é ausente e incipiente na maioria dos cristais, mas em alguns casos, foi possível observar um grau moderado de alteração, indicando exposição da rocha a processos de intemperismo em áreas específicas.

Os minerais de destaque na amostra, conforme demonstrado na Figura 4 e quantificados na Tabela 3, compreendem quartzo, plagioclásio, feldspato potássico, biotita, muscovita, apatita e epidoto. É interessante observar que esses minerais estão em concordância com as análises de Palheta (2001), que conduziu estudos no estado do Pará e do Maranhão, especificamente no interior do Cinturão Gurupi, e também identificou a presença desses minerais na massa rochosa analisada.

A presença de quartzo, ocorreu em cristais anédricos de até 3,0 mm, exibindo contatos que variaram de interlobados a retos, e apresentando extinção ondulante. Apesar de comumente classificado como inerte nos solos agrícolas, este mineral desempenha um papel crucial na estabilidade do solo, especialmente em áreas suscetíveis à erosão (Ribeiro, 2023). Ocasionalmente, foram observadas microfraturas irregulares, sugerindo a ocorrência de tensões na rocha. Maclas (intercrescimento racional de dois

ou mais cristais do mesmo mineral) de deformação foram comuns, algumas delas localmente curvadas. A sericitização e argilização incipientes foram

frequentes, com alguns cristais mostrando níveis moderados dessas alterações.

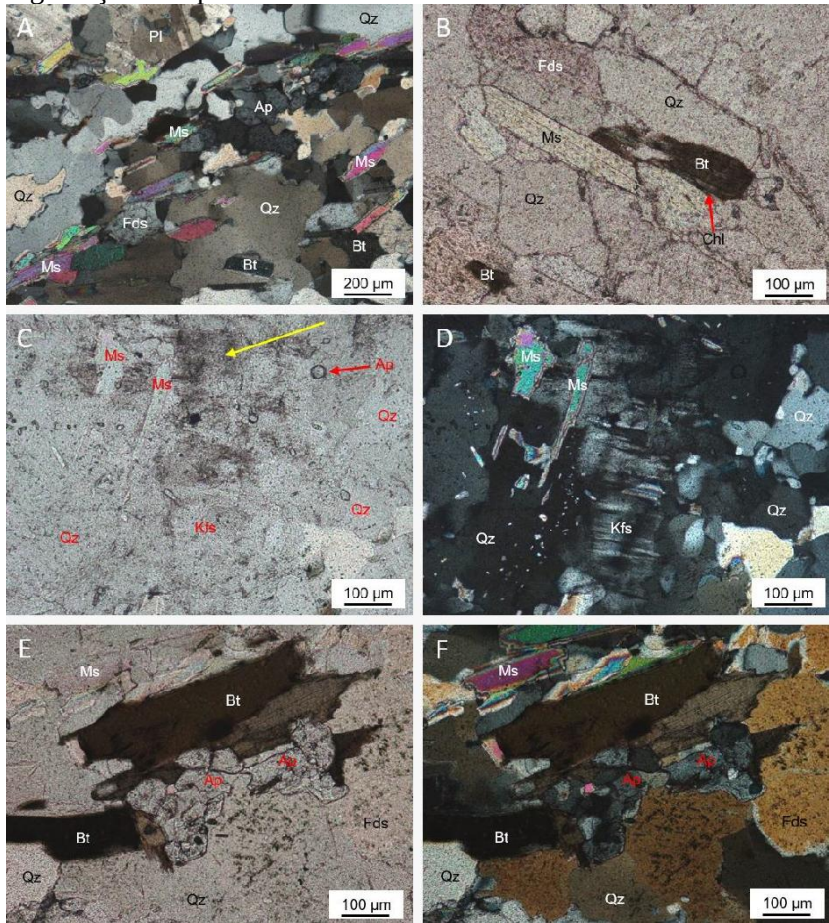


Figura 4. Fotomicrografias da amostra da rocha granítica presente na FIG-PA. a) visão geral da amostra, apresentando composição quartzo-feldspática e minerais micáceos orientados na muscovita e biotita; na imagem os polarizadores cruzados (PX); b) detalhe para lamela de biotita com alteração parcial a clorita, na imagem a polarizadores descruzados (PD); c) e d) detalhe para cristal de feldspato potássico exibindo aspecto enevoadado (seta), por alteração moderada a argilominerais (c: PD; d: PX); e) e f) agregados de cristais de apatita (e: PD; f: PX).

Legenda: Pl: plagioclásio; Qz: quartzo; Ms: muscovita; Bt: biotita; Ap: apatita; Fds: feldspato; Kfs: feldspato potássico.

Tabela 3. Fases minerais presentes na amostra de rocha granítica da pedreira FIG-PA, com indicação de sua composição química e volume modal.

Mineral	Fórmula Química	Volume (%)
Quartzo	SiO ₂ (livre)	46,5
Plagioclásio	(Na,Ca)Al(Al,Si)Si ₂ O ₈	28,2
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	14,3
Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,O,F) ₂	6,3
K-feldspato (Microclina)	KAlSi ₃ O ₈	4,7
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)	<0,1
Argilominerais	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	<0,1
Epidoto	Ca ₂ (Al,Fe)Al ₂ Si ₃ O ₁₂ (OH)	<0,1
Clorita	Mg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	<0,1
Rutilo	TiO ₂	<0,1
Zircão	CaCO ₃	<0,1

Os cristais de feldspato potássico identificados, foram classificados como anédricos a subédricos, com tamanho de até 1,8 mm, apresentando geminação do tipo xadrez, característica da microclina. A maioria dos cristais apresentaram sinais de argilização parcial, e ocasionalmente, microfraturas irregulares foram observadas. A muscovita ocorre em lamelas subédricas a euédricas de até 1,5 mm, exibindo uma orientação preferencial na matriz da rocha. Conforme destacado por Silva et al. (2018), o potássio está presente em minerais silicatados, tais como o feldspato potássico e a muscovita, os quais contêm aproximadamente 10 a 20% de K_2O . Este mineral desempenha papel vital em muitos processos fisiológicos de diferentes espécies de culturas, como fotossíntese, síntese de proteínas, movimento de água nos estômatos e osmorregulação (Wang et al., 2021).

A clorita foi identificada na amostra em uma proporção inferior a 0,1% do volume total (Tabela 3), indicando uma alteração local no mineral. Importante notar que, apesar de sua presença em uma quantidade muito reduzida, a clorita contém magnésio em sua composição. Quando presente no solo, o magnésio representa um papel crucial no metabolismo energético das plantas, integrando-se à molécula de clorofila, como destacado por Malavolta (2008).

Em relação à biotita, esta representou 6,3% do volume total da amostra durante a análise (Tabela 3). Composta quimicamente por potássio, magnésio e ferro, destaca-se por sua taxa de dissolução relativamente rápida ao entrar em contato com as raízes das plantas. Essa característica sugere um potencial significativo para o uso dessas rochas como fonte de potássio para o benefício das plantas, conforme indicado por Manning et al. (2017). Observou-se a presença de biotita em lamelas subédricas a euédricas de até 1,5 mm exibindo uma orientação preferencial, em concordância com os estudos de Yakymchuk (2019). Em algumas áreas, ainda foram identificadas a biotita de textura alongada e com cristais de rutilo acicular.

Foram identificados diversos minerais que abrigam cálcio em sua composição, destacando-se o plagioclásio com uma significativa participação de 28,2% no volume da amostra (Tabela 3). Em contrapartida, a apatita, epidoto e zircão apresentaram volumes menores na amostra, cada um representando menos de 0,1%. Conforme destacado por

Lourenzi et al. (2019), a presença do cálcio no solo desempenha um papel crucial na constituição da parede celular vegetal de espécies agrícolas, conferindo fortalecimento aos diversos órgãos das plantas e contribuindo para a manutenção do equilíbrio entre alcalinidade e acidez no meio e na seiva das plantas.

Os cristais de plagioclásio identificados foram considerados subédricos a anédricos, atingindo até 5,0 mm de tamanho. Zircões, com diâmetro inferior a 0,1 mm, também foram encontrados como inclusões arredondadas na biotita, formando halos pleocróicos. Os cristais subédricos de apatita, com diâmetros de até 0,8 mm, foram encontrados tanto de forma isolada como agrupados na matriz da rocha. É relevante ressaltar que, embora a apatita constitua uma fração reduzida na amostra (<0,1%), ela representa a única fonte de fósforo quantificada por aproximadamente 1,0% sob a análise mineralógica da amostra FIG-PA (Tabela 1). Conforme apontado por Magolbo (2019), o fósforo, quando incorporado ao solo e absorvido pelas plantas, desempenha um papel fundamental como agente nos processos de fotossíntese, reprodução, crescimento e sustentação das plantas.

Também foram identificados pequenos cristais de epidoto, com diâmetro inferior a 0,1 mm, localizados em algumas áreas da amostra. Essa associação sugere processos metamórficos ou de alteração localizados que afetam a composição mineral da rocha.

A concentração de sílica livre na amostra é significativamente elevada, atingindo 46,5%, ultrapassando em 25,0% o limite mínimo estabelecido pela IN N° 05 de 10 de março de 2016 (Tabela 3). Esse resultado está de acordo com as descobertas de Silva e Silva (2023), que, ao investigarem o granito de Tracuateua, Pará, identificaram uma dosagem ainda maior, de 73,7%. Contudo, a utilização deste material não promoveu melhorias na produtividade vegetal nem na fertilidade do solo com gramínea (Capim-BRS – Tamani: *Panicum maximum* Jacq.). Além disso, Niewinski (2017) analisou um basalto da Pedreira Alfama, em Montenegro (RS), que continha os minerais plagioclásio, quartzo, zeólita e esmectita, com uma concentração de sílica livre de 54,6%, o que estava também em desacordo com as exigências da IN N° 05 de 10 de março de 2016.

É importante ressaltar que a sílica livre, conhecida por sua alta dureza e resistência,

pode, em concentrações elevadas, resultar na arenização do solo, tornando-o improdutivo para as plantas (Araújo et al., 2023). No entanto, Wang (2021) demonstrou que o uso de bactérias solubilizantes de silício pode remover a sílica presente na bauxita, atenuando seus efeitos negativos. Paralelamente, estudos também indicam que a presença de sílica, em concentrações adequadas, pode melhorar a resistência e a rigidez estrutural das plantas (Cassel et al., 2021).

Do ponto de vista mineralógico, fica claro que a amostra analisada possui uma significativa proporção de minerais inertes ou com capacidade extremamente limitada de dissolução e liberação de nutrientes. Essa característica é predominantemente atribuída ao quartzo e à muscovita, que juntos representam aproximadamente 60% do volume total da amostra. Além disso, deve-se observar que os minerais de muscovita e feldspato potássico, que abrigam a maior taxa de K_2O , em torno de 6,0%, também exibem uma baixa taxa de dissolução. Consequentemente, conforme destacado por Machado (2023), para alcançar a dissolução eficaz desses minerais no solo em um prazo adequado para os produtores agrícolas, muitas vezes são necessários processos como moagem até alcançar uma granulometria muito fina e/ou a utilização em conjunto com atividades biológicas, como adubação verde, adubação orgânica ou a aplicação de inoculantes.

É relevante observar que a presença de microfraturas e os primeiros estágios de argilização na microclina sugerem um potencial para a dissolução e liberação de nutrientes nessa fase mineral. Esse aspecto indica que, com os processos apropriados e tempo suficiente, a microclina pode contribuir para o aporte de nutrientes no solo, tornando-se uma fonte valiosa para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Além do que, a eficiência da rochagem nas culturas depende de exsudados de raízes, ácidos orgânicos, que contribuem para o processo de intemperismo, o que pode mudar dependendo da cultura (Harley & Gilkes, 2000). A biointemperização promove um aumento na atividade microbiana após a adição de pó de rocha ao solo, sendo que uma maior atividade microbiana pode tornar os nutrientes mais rapidamente disponíveis (Silva, 2023). Entretanto existe uma lacuna muito grande de pesquisas que abordam este tema na região Amazônica.

Conclusão

A análise revelou que os parâmetros do pó de rocha granítica da Fazenda Igarapé Grande apresentam limitações em relação aos critérios estabelecidos pela Instrução Normativa N° 05 de 10 de março de 2016 para classificação como remineralizador de solo ou material secundário. Contudo, o material se destaca pela sua elevada concentração de K_2O , indicando um potencial promissor para aplicação em blendagens. Para aumentar sua eficácia como componente adicional, recomenda-se combiná-lo com minerais que apresentem menor teor de quartzo e maior concentração de CaO e/ou MgO , como a Biotita-Xisto da suíte intrusiva de Tracuateua (PA), que possui valores expressivos de CaO (1,3%) e MgO (2,3%), além de vantagens logísticas pela proximidade com a região (Conceição et al., 2023).

Essas estratégias tem o potencial de maximizar os recursos locais, fazendo deles uma alternativa viável e sustentável para a agricultura regional. A realização de testes agrônômicos e estudos de incubação é essencial para avaliar seu desempenho prática no campo, validando sua eficácia como insumo agrícola. Assim, o pó de rocha granítica da Fazenda Igarapé Grande pode contribuir significativamente para a melhoria da qualidade física e química do solo, redução da dependência de fertilizantes químicos e fortalecimento da agricultura sustentável na região, alinhando-se ao objetivo do trabalho de explorar soluções acessíveis e sustentáveis para os desafios da fertilidade do solo.

Agradecimentos

À CAPES pela concessão da bolsa, fundamental para a realização deste trabalho e aos proprietários da Fazenda Igarapé Grande.

Referências

- Araújo, P. C., Ribeiro, C. De. M., Câmara, G. De. R., Goes, M. A. C. De., & Sobral, L. G. S. (2023). *Remineralizadores de solos: Importância e perspectivas futuras*. CETEM/MCTI.
- Avila, E. L., & Correa, A. X. Da. R. (2024). Potential of Valsungana Granite: Source of K and Sustainability in Agriculture. *Revista de Geociências do Nordeste*, 10(1), 389-401.

- <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID35184>.
- Bamberg, A. L., Martinazzo, R., Silveira, C. A. P., Pillonm, C. N., Stumpf, L., Bergmann, M., Straaten, P. V., & Martins, E. S. (2023). Soil fertilization and Maize-Wheat grain production with alternativa sources of nutrientes. *Europe PMC*, 1(1), 1-27. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2406512/v1>.
- Barros, M. M., & Ribeiro, R. C. Da. C. (2021). *Fertilização e correção de solos utilizando resíduos de rochas ornamentais – Estado da Arte*. CETEM/MCTI. <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2394>.
- Beltran, M. L. F. (2023). *Pó de Diabásio e disponibilidade do fósforo no solo*. [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. Repositório digital de USP. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/1/11140/tde-09022023-175722/en.php>.
- Bem, L., & Theodoro, S. R. (2023). Ocorrências de Rochas com Potencial para o uso como Remineralizadores de Solo nas Mesorregiões Nordeste e Sudeste do Pará. *Boletim do Museu de Geociências da Amazônia*, 10(1), 1–22. 10.31419/ISSN.2594942X.v102023i1agro mineraisa1LPB.
- Cassel, J. L., Gysi, T., Rother, G. M., Pimenta, B. D., Ludwig, R. L., & Santos, D. B. dos. (2021). Benefício da aplicação de silício em plantas. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(4), 6601- 6615. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-140>.
- Cirino, E., Veiga, L., Antunes, M., Alves, V., & Valdo, C. O. P. (2021). *O uso de fertilizantes e seus impactos ambientais* [Monografia de Conclusão de Curso, ETEC Benedito Storani]. Repositório digital Instituto do Conhecimento. <https://ric.cps.sp.gov.br/>.
- Conceição, H. M., Sotero, A. M., Angelica, R. S., & Paz, S. P. A. (2023). Biotita-xisto da suíte intrusiva Tracuateua do Nordeste do Pará e seu potencial agromineral. *Boletim do Museu de Geociências da Amazônia*, 10(1), 1–18. 10.31419/ISSN.2594942X.v102023i1agro mineraisa6HMC.
- Duarte, W. M., Mafra, A. L., Foresti, M. M., Piccolla, C. D., & Almeida, J. A. de. (2013). Potencial de olivina melilitito, granito e sienito na disponibilização de potássio em solos. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 12(1), 68-77.
- Gasparotto, J., & Martinello, K. D. B. (2021). Coal as an energy source and its impacts on human health. *Energy Geosci.*, 2(2), 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.07.003>.
- Gomes, J. I. T. (2021). *Desempenho agrônômico da cultura do milho e da soja em resposta a aplicação de subprodutos de rochagem e de Azospirillum Brasiliense* [Monografia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul]. Repositório Digital da UERS. <https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/handle/123456789/1745>.
- Grant, W. H. (1969). Abrasion pH, na index of chemical weathearing. *Clays and Clay Minerals*, 17 (1), 151-155.
- Harley, A., & Gilkes, R. J. (2000). Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56(1), 11-36.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Produção Agrícola Municipal*. <http://www.sidra.ibge.gov.br/Tabela/5457#r#resultado>.
- Khan, M. A., & Rana, H. (2020). Granite Slurry: A Valued By-Product as Fertilizer. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 5(4), 143-145.
- Klein, E. L., & Lopes, E. C. S. (2011). *Geologia e recursos minerais da folha Centro Novo do Maranhão SA.23-Y-B-I: estados do Maranhão e Pará: escala 1:100.000*. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/11429>.
- Klein, E. L., Koppe, J. C., & Moura, C. A. V. (2002). Geology and geochemistry of the Caxias gold deposit, and geochronology of the of the gold-hosting Caxias Microtonalite, São Luís Craton, Northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(1), 837-849.
- Kwekam, M. (2020). *The Pan-African pluton of Fomopea (West Cameroon): Structural Framework-Petrology-Geochemistrygeodynamic interpretation* [Tese de doutorado, Cameroon, University of Yaoundé]. Repoitório digital Yaoundé.
- Lourenzi, C. R., Jucinei, J. C., Loss, A., Ferreira, P. A. A., Souza, M., Benedet, L., Ferreira, G. W., & Guimbelli, L. D. (2019).

- Fertilidade do solo e nutrição na produção e sanidade de plantas. In M. J. Stadnik, A. C. Velho, S. E. Zorrilla (Org.), *Desenvolvimento sustentável na produção Agroalimentar* (Vol. 1, pp. 42-52). CCA/UFSC.
<https://labfitop.paginas.ufsc.br/files/2017/03/Livro-DES-SUSTENTAVEL-PROD-AGRO.pdf>.
- Machado, H. M. A., & Alves, H. M. (2023). *Rochagem como uma técnica suplementar aos fertilizantes: uma revisão* [Dissertação Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará]. Repositório Digital da UFC. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75392>.
- Magolbo, L. A. de. S. (2019). *Efeito da adubação fosfatada no crescimento, produtividade e acúmulo de fósforo e amido em mandioca para indústria* [Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista]. Repositório Digital da UEP. <http://hdl.handle.net/11449/181498>.
- Malavolta, E. (2008). O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais. *Informações Agronômicas*, 121, 1-24.
- 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(1), 76-481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.086>.
- Niewinski, F. da. S. (2017). *Do pó de rocha à fertilidade: uma experiência nos solos de Montenegro/RS* [Monografia de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Repositório Digital da UFRN. <http://hdl.handle.net/10183/172258>.
- Palheta, E. S. de. M. (2001). *Evolução geológica da região Nordeste do estado do Pará com base em estudos estruturais e isotópicos de granitóides* [Monografia de Mestrado, Universidade Federal do Pará]. Repositório Digital da UFPA. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/246>.
- Piza, P. A.T., França, S. C. A., & Bertolino, L. C. (2010). *Caracterização mineralógica de fontes alternativas para potássio*. CETEM/MCT.
- Ribeiro, L. L. O. (2023). *Efeito do pó de rocha de basalto, cama de frango e esterco bovino nos atributos químicos do solo, teores de nutrientes foliares e produtividade da soja e milho segunda safra* [Tese Doutorado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná]. Repositório Digital do UEOP. <https://tede.unioeste.br/handle/tede/6754>.
- Schaefer, C. E. G. R., Lima, H. N. De., Teixeira, W. G., Vale Jr., J. F. Do., Souza, K. W. De., Correia, G. R., Mendonça, B. A. F. De., Amaral, E. F., Campos, M. C. C., & Ruivo, M. De. L. (2017). Solos da região Amazônica. In N. Curi, J. C. Ker, R. F. Novais, P. V. Torrado, C. E. G. R. Schaefer (Org.), *Pedologia: solos dos biomas brasileiros* (Vol. 1, pp. 111-175). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. <https://repositorio.usp.br/item/002863795>.
- Silva, B., Paradelo, R., Vazquez, N., Garcia-Rodeja, E., & Barral, M. T. (2013). Effect of the addition of granitic powder to an acidic soil from Galicia (NW Spain) in comparison with lime. *Environmental Earth Science*, 68(1), 429-437. 10.1007/s12665-012-1747-3.
- Silva, E. De. V. (2023). *Biossolubilização de pó de rocha rico em silicato pelos fungos Trichoderma sp. e Paecilomyces sp* [Monografia, Universidade Federal de Uberlândia]. Repositório Digital da UFU. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/38361>.
- Silva, I. M. Da., & Silva, R. M. (2023). *Efeito residual de subproduto de granito em capim Tamani no município de Paragominas-PA* [Monografia, Universidade Federal Rural da Amazonia]. Repositório Digital da UFRA. <http://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/3468>.
- Silva, R. R., Carvalho, I. S. B., & Rocha, S. D. F. (2018). Transformações químicas e mineralógicas em mistura de rocha potássica e calcário submetida a processo térmico visando a liberação do potássio contido. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, 15(4), 369-376. 10.4322/2176-1523.20181473.
- Silva-Hermo, B. S., Rodeja, E. G., Nunez, R. P., & Barral, M. T. (2013). Effect of the addition of granitic powder to an acidic soil from Galicia (NW Spain) in comparison with lime. *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 429-437. 10.1007/s12665-012-1747-3.
- Silveira, C. A. P., Bamberg, A. L., Martinazzo, R., Pillon, C. N., Martins, E. De. S., & Piana, C. F. De. B. (2016). Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de Remineralizadores de solo – Uma proposta da Embrapa. In A. L. Bamberg, C. A. P.

- Silveira, E. S. Martins, M. Bergmann, R. Martinazzo, S. H. Theodoro (Org.), *Anais III Congresso Brasileiro de Rochagem* (Vol. 3, pp. 221-237). Triunfal Gráfica e Editora. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164495/1/3CBR-219-237.pdf>.
- Stocker, C. M., Monteiro, A. B., Ribeiro, P. L., Giacomini, S. J., Martinazo, R., Silveira, C. A. P., & Bamberg, A. L. (2016). Efeito do xisto retornado em atributos químicos do solo. Parte III - Elementos potencialmente tóxicos. In A.L. Bamberg, C. A. P. Silveira, E. de S. Martins, M. Bergmann, R. Martinazzo, S. H. Theodoro (Org.), *Anais III Congresso Brasileiro de Rochagem* (p. 265-268). Embrapa Cerrado. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165959/1/Carlos-Augusto8-Livro-rochagem.pdf>.
- Swoboda, P., Döring, T. F., & Hamer, M. (2021). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of The Total Environment*, 807(1), 150976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.
- Tamfuh, P. A., Ibrahim, B. A., Chotangui, A. H., Cham, G. C., Ngonjang, L. W., Mfouapon, H. Y., Mounjeu, E. D., Kabeyene, V. K., & Bitom, D. (2022). Fertilizing Potential of Basalt and Granite Fines for *Vigna unguiculata* Production and Residual Effect on *Telfaira occidentalis* Performance in the Cameroon Western Highlands: Fertilizing potential of basalt and granite fines. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 4(3), 395-406.
- Theodoro, S. H., Leonardos, O. H., & Almeida, E. (2010). Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos. In E. de S. Martins, S. H. Theodoro (Org.), *Congresso Brasileiro de Rochagem* (Vol. 1, pp. 173-181). Embrapa Cerrados. https://www.sgb.gov.br/remineralizadores/media/anais_Icbr_2009.PDF.
- Wang, Y., Chen, Y. F., & Wu, W. H. (2021). Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(1), 34–52. [10.1111/jipb.13053](https://doi.org/10.1111/jipb.13053).
- Yakymchuk, C. (2019). On granites. *Journal of the Geological Society of India*, 94(1), 9-22. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1261-2>.