



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO
DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

FERNANDO LUIS DINIZ D'AVILA

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS EM SOLOS COM USO REGULAR DE BLEND DE
PÓ DE ROCHA

FLORIANÓPOLIS

2026

FERNANDO LUIS DINIZ D'AVILA

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS EM SOLOS COM USO REGULAR DE BLEND DE
PÓ DE ROCHA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Agroecossistemas da Universidade Federal de
Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Arcângelo Loss

Coorientador: Prof. Dr. Cledimar Rogério Lourenzi

FLORIANÓPOLIS

2026

D'Avila, Fernando Luis Diniz
Atributos químicos e físicos em solos com uso regular
de blend de pó de rocha / Fernando Luis Diniz D'Avila ;
orientador, Arcângelo Loss, coorientador, Cledimar Rogério
Lourenzi, 2026.
118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Remineralizadores. 3. Solos. 4.
Blend de pó de rocha. I. Loss, Arcângelo . II. Lourenzi,
Cledimar Rogério. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas.
IV. Título.

FERNANADO LUIS DINIZ D'AVILA

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS EM SOLOS COM USO REGULAR DE BLEND DE PÓ DE ROCHA

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 29 de agosto de 2025, pela
banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Daniel Alexandre Heberle
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Lucas Raimundo Rauber
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas



Documento assinado digitalmente

Oscar Jose Rover

Data: 31/03/2026 09:33:02-0300

CPF: ***.116.509-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Oscar José Rover



Documento assinado digitalmente

Arcangelo Loss

Data: 31/03/2026 08:08:43-0300

CPF: ***,005.567-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Orientador

Arcângelo Loss

Florianópolis, 2026

*À memória de minha mãe, que, mesmo enfrentando a dor e a luta contra o câncer,
sempre me inspirou com sua força, coragem e amor incondicional.
Sua presença permanece viva em cada conquista e em cada passo desta caminhada. Dedico
este trabalho a você, mãe, com gratidão eterna e a certeza de que sua luz
continuará guiando meus caminhos.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o amor, apoio e compreensão durante este percurso. Cada palavra de incentivo e cada gesto de carinho foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos meus professores, pela dedicação, paciência e por compartilharem não apenas conhecimento acadêmico, mas também valores que levarei para além da vida profissional.

Aos amigos, que souberam compreender minhas ausências, me ofereceram escuta e palavras de encorajamento, sendo parte essencial deste processo.

Aos colegas do programa de pós-graduação, pelo convívio, pelas trocas de experiências e pelo companheirismo que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

Sumário

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	9
ABSTRACT	10
INTRODUÇÃO.....	11
1.1 HIPÓTESE	14
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 REMINERALIZADORES DE SOLO E SUA LEGISLAÇÃO	15
3.2 LIMITAÇÕES DA IN Nº 5/2016	16
3.3 POTENCIAL BRASILEIRO	19
3.4 FERTILIDADE DO SOLO: UMA ABORDAGEM SISTÊMICA E CONTEMPORÂNEA	20
3.5 REMINERALIZADORES E FERTILIZANTES A BASE DE NPK NO CONTEXTO DA FERTILIDADE DO SOLO.....	22
3.6 REMINERALIZADORES E O SOLO	24
3.6.1 Efeitos Químicos	24
3.6.2 Efeitos Físicos e Biológicos	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	28
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES.....	31
4.2.1 Assentamento Manoel Alves Ribeiro – MIMO	31
4.2.2 Colônia Escada	33
4.2.3 Paula Freitas	34
4.3 BLEND MICROGABRO E LATITO	36
4.4 ANÁLISES DOS PÓS DE ROCHAS	36
4.5 AMOSTRAGEM DE SOLO	40
4.5.1 Coleta de Amostras para a Determinação da Densidade do Solo.....	41
4.5.2 Estabilidade dos Agregados.....	41
4.5.3 Teores de carbono e nitrogênio totais do solo	42
4.5.4 Matéria orgânica leve em água (MOL)	42
4.5.5 Atributos Químicos Avaliados	43
4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	43
4.6.1 Análises estatísticas univariadas e multivariadas	43

4.6.2 Factor analysis for mixed data.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS.....	44
5.1.1 pH em Água.....	44
5.1.2 Alumínio.....	46
5.1.3 Acidez Potencial (H+Al)	48
5.1.4. Cálcio.....	50
5.1.5. Magnésio	52
5.1.6. Potássio.....	54
5.1.7. Saturação Por Bases	56
5.1.8. CTC	58
5.1.9. Fósforo.....	60
5.1.10. Carbono	62
5.1.11. Nitrogênio.....	64
5.1.12. Cobre	65
5.1.13. Ferro	67
5.1.14. Manganês	69
5.1.15. Zinco.....	71
5.2. ATRIBUTOA FÍSICOS.....	73
5.2.1 Densidade	73
5.2.2 Estabilidade de Agregados (Diâmetro Médio Ponderado – DMP)	75
5.2.3. Matéria Orgânica Leve em Água – MOL	77
5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DO SOLO	79
6. ANÁLISE MULTIVARIADA POR FACTOR ANALYSIS FOR MIXED DATA - FAMD ..	81
6.1 Análise multivariada dos atributos do solo por FAMD	81
6.1.1 FAMD Área MIMO.....	82
6.1.2 FAMD Área Colônia Escada	84
6.1.3 FAMD Área Paula Freitas	85
6.1.4 Análise FAMD conjunta das áreas	87
7. CONCLUSÕES.....	89
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS.....	103

RESUMO

A busca pela sustentabilidade nos sistemas agrícolas mundiais tem direcionado as pesquisas para o desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ambientalmente adequadas para uma agricultura moderna e produtiva. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do uso contínuo de um blend de pós de rochas basálticas, 70% de microgabro e 30% de latito, em locais com diferentes tempos de uso, sobre os atributos químicos e físicos do solo sob diferentes usos agrícolas. Foram estudadas três áreas com solos e usos contrastantes no Sul do Brasil, que utilizam o blend de rochas há diferentes períodos. A pesquisa foi realizada nos municípios de Irineópolis no planalto norte catarinense (Assentamento MIMO e Colonia Escada) em SC, e em Paula Freitas, região sul do Paraná. Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-30 cm para análise dos teores de macro e micronutrientes, carbono orgânico total, estabilidade de agregados, densidade do solo e matéria orgânica leve (MOL). No Assentamento Mimo, com aplicação há mais de dez anos em sistema orgânico, os resultados indicaram manutenção de níveis adequados de pH e saturação por bases, mas sem efeitos marcantes sobre o acúmulo de nutrientes como Ca, Mg e P, uma vez que a adubação verde e os compostos orgânicos já garantem aporte constante de matéria orgânica e nutrientes. Os valores de densidade foram mais baixos na área com remineralizador, embora a MOL tenha sido menor, devido ao revolvimento mecânico que acelera a decomposição. Assim, no Mimo, o principal papel do remineralizador parece ser o de complementar o manejo orgânico, sustentando o equilíbrio químico do solo em longo prazo. Na Colônia Escada, onde o remineralizador foi aplicado recentemente (2020 e 2022), os efeitos foram mais evidentes na química do solo, com redução significativa do alumínio em subsuperfície e ganhos de saturação por bases. Entretanto, a MOL foi menor nas parcelas com remineralizador, o que, aliado ao histórico de preparo mecânico intensivo (aração, gradagem e subsolagem), indica que o curto tempo de uso ainda não foi suficiente para estabilizar a fração lábil. Além disso, os valores mais altos de densidade no tratamento com remineralizador refletem os efeitos estruturais negativos do manejo intensivo, que se sobrepõem ao potencial benéfico do insumo. Em Paula Freitas, com aplicação contínua do remineralizador desde 2010, associado ao gesso agrícola anual e adubações químicas de alta solubilidade, observou-se um efeito cumulativo mais claro. Houve redução do alumínio, aumento da saturação por bases e incrementos expressivos em potássio e manganês, demonstrando a contribuição gradual do insumo para a fertilidade do solo. Os atributos físicos também foram favorecidos: a densidade foi menor e a estabilidade dos agregados maior na área com remineralizador, o que está relacionado com o maior acúmulo de MOL em superfície. Nesse ambiente, o uso de pó de rocha em longo prazo mostrou-se efetivo não apenas para corrigir a acidez, mas também para sustentar a estrutura física do solo. O presente estudo demonstrou que os efeitos do uso contínuo do remineralizador (blend de microgabro + latito) sobre os atributos químicos e físicos do solo são fortemente modulados pelo histórico de manejo, tempo de aplicação do insumo e pelas condições específicas de cada área avaliada.

Palavras-chave: Pó de rocha; Basalto; Sustentabilidade; Nutrientes; Biointemperismo

ABSTRACT

The search for sustainability in global agricultural systems has driven research toward the development of more efficient and environmentally suitable alternatives for modern and productive agriculture. This study aimed to evaluate the effects of the continuous use of a basaltic rock powder blend composed of 70% microgabbro and 30% latite—applied over different time periods, on the chemical and physical attributes of soil under distinct agricultural uses. Three areas with contrasting soils and land uses in southern Brazil were investigated, all of which have used the rock blend for varying durations. The study was conducted in the municipalities of Irineópolis, in the northern plateau of Santa Catarina State (MIMO Settlement and Colônia Escada), and in Paula Freitas, in southern Paraná State. Soil samples were collected at depths of 0–5, 5–10, and 10–30 cm to determine macro- and micronutrient contents, total organic carbon, aggregate stability, bulk density, and light organic matter (LOM). At the MIMO Settlement, where the remineralizer has been applied for more than ten years under an organic system, results indicated the maintenance of adequate pH and base saturation levels, but no pronounced effects on nutrient accumulation such as Ca, Mg, and P, likely due to the consistent input of organic matter and nutrients from green manures and composts. Bulk density values were lower in the remineralizer-treated area, although LOM was reduced, possibly due to mechanical soil disturbance accelerating decomposition. In this site, the remineralizer appears to play a complementary role in sustaining long-term soil chemical balance. In Colônia Escada, where the remineralizer was applied more recently (2020 and 2022), more evident effects on soil chemistry were observed, including a significant reduction in subsurface aluminum and increased base saturation. However, LOM was lower in treated plots and combined with the history of intensive mechanical tillage (plowing, harrowing, and subsoiling), suggests that the short application period has not yet allowed stabilization of the labile organic fraction. Higher bulk density values in the remineralizer treatment also reflect the negative structural effects of intensive soil management, which may outweigh the potential benefits of the input. In Paula Freitas, where the remineralizer has been continuously applied since 2010 in combination with annual gypsum applications and highly soluble mineral fertilizers, a clearer cumulative effect was observed. There was a reduction in aluminum, increased base saturation, and significant gains in potassium and manganese, demonstrating the gradual contribution of the input to soil fertility. Physical attributes were also improved, with lower bulk density and higher aggregate stability in the treated area, associated with greater accumulation of LOM at the surface. In this environment, long-term use of rock powder proved effective not only in correcting soil acidity but also in maintaining soil physical structure. Overall, the study demonstrated that the effects of continuous remineralizer use (microgabbro + latite blend) on soil chemical and physical attributes are strongly influenced by management history, duration of application, and site-specific conditions.

Keywords: Rock powder; Basalt; Sustainability; Nutrients; Bioweathering

INTRODUÇÃO

A busca pela sustentabilidade nos sistemas agrícolas mundiais tem direcionado as pesquisas para o desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ambientalmente adequadas para uma agricultura moderna e produtiva. O aumento da população mundial, projetado para os próximos anos, traz consigo a necessidade de alimentar mais de 9,7 bilhões de pessoas em 2050 e apresenta o imenso desafio de diminuir o número de pessoas famintas no mundo até 2030, considerando que, por mais de uma década, esse número tem crescido de forma constante (FAO, 2019). Nesse contexto, apesar dos avanços tecnológicos, a produção agrícola ainda enfrenta o desafio de manter a produtividade sem comprometer os recursos naturais.

Esse dilema está diretamente relacionado à forma como os solos são manejados e nutridos ao longo do tempo, sobretudo em regiões tropicais como o Brasil. A fertilização dos solos, com o fornecimento adequado de nutrientes essenciais às plantas, é fundamental para as produções agrícolas. Os nutrientes são vitais para que as plantas alcancem a maturidade e possam completar seu ciclo produtivo. Cada elemento mineral tem uma função específica no metabolismo vegetal, garantindo sua qualidade estrutural e fisiológica. Por esse motivo, é necessário que esses elementos sejam fornecidos no momento e nas quantidades adequadas para o pleno desenvolvimento das culturas (ALMEIDA et al., 2021).

Dessa forma, o manejo adequado da fertilidade dos solos é um dos principais pilares para a sustentabilidade agrícola, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural, como os brasileiros. No entanto, essa condição agrava a dependência do país por fertilizantes minerais importados, como o cloreto de potássio, fertilizantes fosfatados e fertilizantes nitrogenados. Atualmente, o Brasil depende de mais de 33 milhões de toneladas desses insumos, o que corresponde a mais de 80% dos fertilizantes utilizados no país, gerando um custo superior a 9 bilhões de dólares. O país é aquele que apresenta a maior dependência de importação de *commodities* fertilizantes dentre os maiores consumidores destes insumos, sendo 100% dos fertilizantes nitrogenados, 73,8% dos fosfatados e 98% dos potássicos (FAOSTAT, 2023).

Essa dependência extrema encarece a produção e impacta diretamente os preços das *commodities* e alimentos (ANDA, 2020). Em 2020, o país era o 4º maior consumidor mundial de fertilizantes, atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos (SAE-PR, 2020). Além dos impactos econômicos, essa dependência gera também vulnerabilidade geopolítica e logística para o agro brasileiro, setor que continua tendo um papel preponderante na composição do Produto Interno Bruto (PIB) do país. A gravidade desta situação mostrou-se bastante emblemática durante os conflitos no Leste Europeu e no Oriente Médio, quando os preços

alcançaram valores vultuosos devido aos riscos de manutenção da oferta e de transporte. Paralelamente, eventos climáticos extremos agravaram a situação, com recorrentes secas, enchentes e queimadas incontroláveis em áreas produtivas e naturais, bem como chuvas intensas avassaladoras que carregam solos férteis, desestruturando sistemas de cultivos já estabelecidos.

Diante deste cenário, o governo brasileiro implementou ações do Plano Nacional de Fertilizantes (PNF-2050, Brasil, 2022) como estratégia para enfrentar as crises de desabastecimento de fertilizantes e de mudanças climáticas, por meio do estabelecimento de novas metas e incentivos para outras práticas. O plano considera, além das cadeias de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, as cadeias emergentes de produção de bioinsumos, nanotecnologia e remineralizadores de solos (Brasil, 2022). Neste contexto, cresce o interesse por fontes alternativas de nutrientes para as plantas, que sejam acessíveis, ambientalmente mais adequadas e com potencial de uso regional.

O uso de fontes locais e regionais, como os pós de rochas usados como remineralizadores de solo (REM) e fertilizantes minerais de composição silicática, se apresenta como uma alternativa sustentável promissora. Estes materiais contemplam o aporte de minerais primários e nutrientes aos solos, são amplamente disponíveis em todas as regiões brasileiras, possuem preços mais acessíveis e, indiretamente, podem mitigar parte dos efeitos das mudanças climáticas. No Brasil, o marco regulatório para o uso de REM foi estabelecido pela Lei nº 12.890/2013 e regulamentado pela Instrução Normativa nº 5/2016 do MAPA, que define critérios técnicos para registro e comercialização destes produtos, evidenciando o reconhecimento oficial desta tecnologia.

O Brasil possui ampla geodiversidade, capaz de fornecer diferentes tipos de rochas com propriedades variadas em diversas regiões do país, muitas delas ricas em nutrientes. O microgabro, rocha ígnea básica de granulação fina, é caracterizado por apresentar elevados teores de cálcio, magnésio e ferro, enquanto o latito, rocha vulcânica intermediária, apresenta concentrações significativas de potássio, sódio e outros elementos traço. A combinação dessas duas rochas em um blend proporciona um espectro mais amplo de nutrientes, potencializando os benefícios para a fertilidade do solo. Esses materiais podem melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos tropicais, além de representar uma forma de reaproveitamento de resíduos de mineração e pedreiras, reduzindo o impacto ambiental dessas atividades (Tavares et al., 2018). Complementarmente, esses materiais possuem a vantagem de poderem ser utilizados localmente, promovendo arranjos produtivos descentralizados e fortalecendo economias regionais.

Além disso, o uso de REM pode contribuir para a redução da dependência externa por fertilizantes de acordo com o manejo de produção, ao mesmo tempo que fortalece os arranjos

produtivos locais por meio da descentralização dos fornecedores (WILLER et al., 2021). Outra vantagem relevante está na liberação lenta e gradual dos nutrientes, o que minimiza as perdas por lixiviação e prolonga a ação fertilizante em solos tropicais (SOUZA et al., 2013). Estudos indicam ainda que os REM podem melhorar a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, aumentar a disponibilidade de micronutrientes essenciais como zinco, manganês e ferro, além de contribuir para o aumento do pH em solos ácidos, características particularmente importantes em solos tropicais brasileiros. Adicionalmente, pesquisas têm demonstrado que o uso de REM pode influenciar positivamente os estoques de carbono orgânico do solo e a estabilidade de agregados, contribuindo para a melhoria da estrutura física e da capacidade de retenção de água, aspectos fundamentais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas tropicais. Por estas razões, se recomenda o uso agrônômico de subprodutos provenientes de pedreiras e indústrias de beneficiamento de rochas, visto que permitem o uso de diferentes materiais em distintas regiões como fontes suplementares de nutrientes para o sistema solo-planta (BERGMANN; HOFF; THEODORO, 2009; COLA; SIMÃO, 2012; CAMARA et al., 2021).

No entanto, a adoção em larga escala desses REM ainda enfrenta barreiras técnicas e científicas. Estudos de campo em diferentes tipos de solos e manejos são incipientes, especialmente aqueles que avaliam seus efeitos em médio e longo prazo. Questões relacionadas à padronização da granulometria, dosagens adequadas para diferentes culturas e solos, métodos de aplicação mais eficientes e interações com outros insumos agrícolas ainda necessitam de maior investigação científica. Consequentemente, a real capacidade dos REM de fornecer nutrientes de forma eficaz no curto prazo ainda é motivo de debate (GOTZ et al., 2019). Segundo Carvalho et al. (2018), os resultados desfavoráveis ao uso de pó de rocha geralmente ocorrem em experimentos de curta duração, realizados em condições controladas com solos estéreis, baixa atividade e/ou diversidade microbiana, temperaturas e umidades insuficientes, partículas muito grandes ou doses muito baixas. Tais condições limitam a velocidade das reações químicas, a atividade microbiana e, consequentemente, a disponibilidade dos nutrientes. Assim sendo, ainda há uma lacuna importante quanto à eficácia agrônômica dos REM em sistemas agrícolas reais, sob condições climáticas e edáficas variadas.

Considerando a necessidade de compreender melhor os mecanismos de liberação de nutrientes dos REM em condições de campo, torna-se essencial avaliar não apenas sua eficácia imediata, mas também seus efeitos cumulativos ao longo do tempo em diferentes tipos de solo e sistemas de manejo. O presente trabalho visa contribuir para o preenchimento das lacunas existentes quanto à eficácia dos REM, por meio da avaliação de um *blend* de pó de rocha ao longo do tempo, utilizando uma abordagem baseada em áreas com diferentes tempos de uso do pó de rocha e manejos. Esta metodologia permite analisar a dinâmica de liberação de nutrientes

e seus impactos nos atributos químicos e físicos do solo sob diferentes usos agrícolas, fornecendo dados fundamentais para a tomada de decisão sobre a viabilidade técnica e econômica destes materiais.

Especificamente, este estudo tem como objetivo principal avaliar os efeitos temporais da aplicação de remineralizadores na fertilidade do solo e na produtividade das culturas, bem como identificar os fatores pedológicos e de manejo que influenciam sua eficiência. Para isso, foram analisadas três áreas estabelecidas em distintos tipos de solo (Latosolo, Cambissolo e Gleissolo), todos submetidos a cultivos sob preparo convencional e plantio direto, com aplicações sucessivas de um *blend* de pó de rocha composto por 70% de microgabro e 30% de latito, utilizados como remineralizadores. Os experimentos foram conduzidos nos municípios de Irineópolis no Planalto Norte Catarinense (SC), e Paula Freitas, na região sul do estado do Paraná.

Os resultados desta pesquisa poderão subsidiar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento de cadeias produtivas regionais de remineralizadores, contribuindo para a redução da dependência externa de fertilizantes e para o fortalecimento da agricultura sustentável brasileira. Além disso, espera-se que os dados gerados forneçam parâmetros técnicos para recomendações de uso destes materiais em diferentes condições edafoclimáticas, otimizando sua aplicação e maximizando seus benefícios agronômicos e ambientais.

1.1 HIPÓTESE

O uso contínuo do *blend* de pó de rocha como remineralizador de solos em áreas com diferentes idades promove a liberação gradual de macro e micronutrientes, com impactos positivos nos atributos físicos e químicos, variando conforme o tipo de solo e o sistema de manejo agrícola.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos do uso contínuo de um blend de pós de rochas de composição 70% de microgabro e 30% de latito, em áreas com diferentes idades e histórico de usos, sobre os atributos químicos e físicos do solo.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar os teores de macro e micronutrientes do solo;
- Quantificar o conteúdo de matéria orgânica leve em água do solo;
- Avaliar a estabilidade de agregados e a densidade do solo.

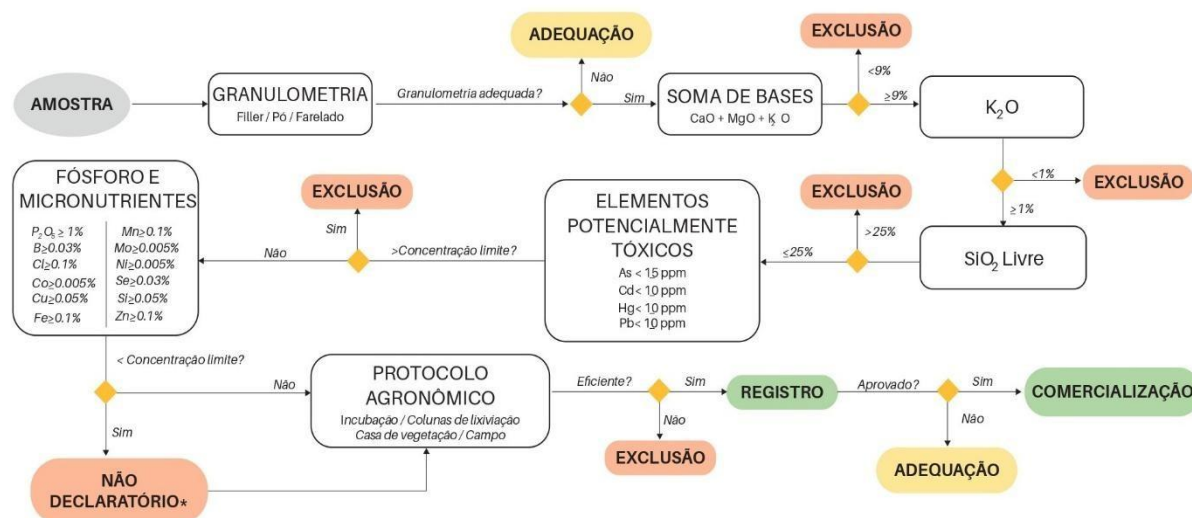
3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 REMINERALIZADORES DE SOLO E SUA LEGISLAÇÃO

Os Remineralizadores de Solo foram definidos no Brasil pela Lei nº 12.890/2013: “Material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo” (BRASIL, 2013). Posteriormente, essa Lei foi regulamentada pelo Decreto nº 8.384/2014 e pelas Instruções Normativas (IN) 5 e 6 de 2016, publicadas pelo MAPA, onde foram definidos os critérios para registro, garantias mínimas, comercialização e fiscalização desses insumos.

Para o registro de remineralizadores, a IN nº 5/2016 estabelece um conjunto de protocolos obrigatórios que envolvem a caracterização físico-química e mineralógica do material, a comprovação da eficiência agrônômica por meio de ensaios a campo com metodologia reconhecida, e a submissão de documentação técnica ao MAPA (Figura 1). Esses protocolos têm por objetivo garantir que o remineralizador ofereça benefícios reais ao solo e às culturas, além de segurança ambiental e agrônômica.

Figura 1. Fluxograma das especificações para remineralizadores da IN 05/2016. Quando os remineralizadores contiverem naturalmente o macronutriente fósforo e micronutrientes, os seus teores podem ser declarados somente se forem iguais ou superiores aos valores expressos no Anexo II da Instrução Normativa MAPA Nº 05/2016. (IN 05/2016, Art. 4., § 1º).



Fonte: SANTOS, NEVES e CAMARA (2022).

Além da caracterização físico-química e mineralógica do remineralizador, a IN 5/2016 determina a necessidade de avaliação da eficiência agronômica do produto por meio da realização de ensaios padronizados. Esses ensaios estão organizados em dois níveis: o Protocolo I, de caráter facultativo, que compreende testes preliminares como incubação ou lixiviação em condições laboratoriais, com foco na dinâmica de liberação de nutrientes no solo; e o Protocolo II, de aplicação obrigatória, que contempla experimentos realizados em condições controladas, como em casa de vegetação, ou diretamente em campo, avaliando os efeitos do remineralizador sobre a fertilidade do solo e o desempenho das culturas agrícolas.

Os ensaios do Protocolo II devem seguir metodologias reconhecidas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS-RS/SC, 2016) ou aquelas previamente aprovadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O objetivo é assegurar que o produto, além de atender aos critérios legais, proporcione ganhos agronômicos mensuráveis e compatíveis com seu uso como condicionador do solo (BRASIL, 2016; CÂMARA et al., 2021). A IN 5/2016 do MAPA (BRASIL, 2016) define os seguintes critérios mínimos:

- Soma de bases totais: óxido de cálcio (CaO) + óxido de magnésio (MgO) + óxido de potássio (K₂O) $\geq$ 9%
- Teor de K₂O total $\geq$ 1%
- Conteúdo de quartzo (SiO₂ livre) $\leq$ 25%
- Concentrações máximas de elementos potencialmente tóxicos: arsênio (As), <15,0 mg kg⁻¹; cádmio (Cd), <10,0 mg kg⁻¹; mercúrio (Hg), <0,10 mg kg⁻¹; chumbo (Pb), <200,0 mg kg⁻¹)
- Teste agronômico de eficiência da rocha em modificar as propriedades de fertilidade do solo e no desenvolvimento de plantas.

Adicionalmente, a norma exige a determinação do pH de abrasão do pó de rocha e classifica a granulometria como: filler <0,3 mm (ABNT nº 50) e pó entre 0,3 mm e 2,00 mm (ABNT nº 50 e nº 10).

3.2 LIMITAÇÕES DA IN Nº 5/2016

A IN nº 5, de 2016, do MAPA, constitui um marco regulatório essencial para a formalização, o controle e o incentivo ao uso de remineralizadores no Brasil. Ao estabelecer critérios técnicos objetivos para a caracterização mineralógica, granulométrica e agronômica desses insumos, a norma contribuiu significativamente para a consolidação de um setor que, até então, operava de maneira informal, oferecendo maior segurança jurídica tanto aos produtores

quanto aos usuários (BRASIL, 2016). Do ponto de vista ambiental, a regulamentação também exerce papel estratégico ao fomentar práticas agrícolas sustentáveis, promovendo o aproveitamento de recursos minerais nacionais abundantes, de baixo custo e com reduzido impacto ambiental (SANTOS CAITANO et al., 2021).

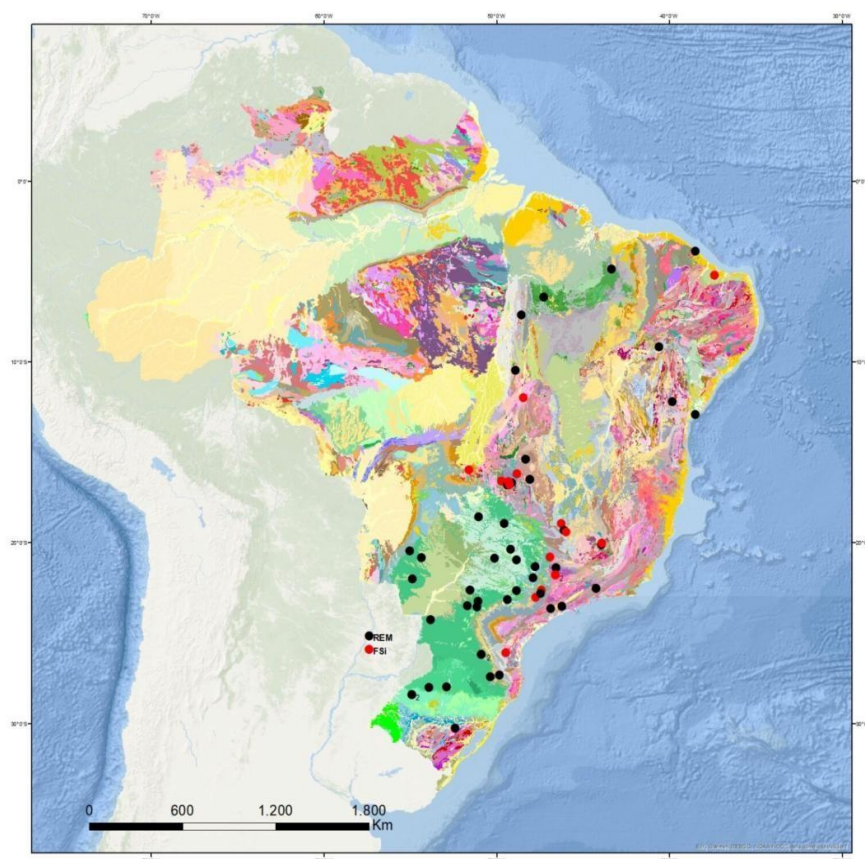
Apesar de seu caráter pioneiro, a IN nº 5/2016 apresenta limitações relevantes que vêm sendo apontadas por diferentes estudos. Um dos principais entraves refere-se à abordagem conservadora adotada nos protocolos de avaliação de eficiência agrônômica. O Protocolo II, obrigatório para o registro de produtos, requer a realização de ensaios em ambientes controlados, como casas de vegetação ou em campo, o que demanda estrutura técnico-científica muitas vezes inacessível a pequenos produtores e instituições de menor porte (BATISTA et al., 2017; DANTAS et al., 2022). Essa exigência pode atuar como barreira burocrática à inovação local e à democratização do uso de remineralizadores.

Adicionalmente, o critério que determina a presença mínima de três minerais identificáveis na composição do produto, embora bem-intencionado, pode acabar excluindo materiais com composição mineralógica mais simples, porém relevantes regionalmente. Tal como destaca Martins et al. (2023), a diversidade mineral exigida visa garantir a multifuncionalidade agrônômica dos remineralizadores, mas pode limitar o aproveitamento de fontes naturais disponíveis em diferentes biomas brasileiros. Ainda, a restrição da IN quanto ao processamento mecânico, com proibição de qualquer modificação térmica ou química, pode ser considerada excessivamente rígida frente às inovações tecnológicas que buscam otimizar a biodisponibilidade de nutrientes sem comprometer a segurança ambiental.

No plano técnico-científico, a norma também carece de maior clareza quanto aos critérios de interpretação dos resultados dos ensaios agrônômicos. A ausência de faixas de referência adaptadas a diferentes condições edafoclimáticas e culturas agrícolas resulta em margem de subjetividade nos processos de avaliação técnica e homologação. Além disso, a IN não contempla, de forma sistematizada, os efeitos ecológicos e microbiológicos decorrentes da aplicação dos remineralizadores no solo, o que se revela um entrave à sua inserção plena em sistemas agroecológicos e de base regenerativa (MARTINS et al., 2023).

Existe ainda uma limitação estrutural relacionada à disponibilidade de laboratórios credenciados e instituições capacitadas para condução dos ensaios exigidos, especialmente em regiões Norte e Nordeste do país. Essa desigualdade regional, já evidenciada por Dantas et al. (2022) e Santos Caitano et al. (2021), favorece a concentração dos registros e desenvolvimentos técnicos em polos mais estruturados, como as regiões Sudeste e Sul, dificultando o acesso amplo e descentralizado a essa importante tecnologia agrícola, conforme demonstra a Figura 2.

Figura 2. Localização das empresas registradas como produtores de remineralizadores (REM) e fertilizantes minerais simples de composição silicática (FSI). Na figura é possível observar uma maior concentração na região sudeste e sul em comparação com o norte e nordeste. Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2024; MARTINS et al., 2024).



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2024; MARTINS et al., 2024).

A maioria das pesquisas disponíveis sobre os REM concentra-se em experimentos de curta duração, geralmente com foco em um único ciclo agrícola e sob condições controladas, o que dificulta a extrapolação dos resultados para escalas de produção mais amplas e variadas condições edafoclimáticas (MARTINS et al., 2023; DANTAS et al., 2022). Segundo Batista et al. (2017), a dinâmica de liberação de nutrientes dos remineralizadores é lenta e contínua, ocorrendo ao longo de meses ou até anos, o que requer abordagens metodológicas específicas para avaliação de sua eficiência agrônoma. No entanto, a maioria dos protocolos de pesquisa ainda utiliza métricas adaptadas aos fertilizantes solúveis convencionais, o que não capta adequadamente os efeitos graduais proporcionados pelas rochas moídas.

Além disso, Martins et al. (2023) destacam que a aplicação repetida e cumulativa de remineralizadores pode promover melhorias progressivas na fertilidade do solo, na estrutura física e na biota edáfica, efeitos que só se manifestam plenamente após sucessivas safras. Dessa forma, a ausência de projetos com monitoramento multianual representa uma limitação

significativa para a comprovação técnica de sua viabilidade e a ampliação de seu uso em larga escala.

3.3 POTENCIAL BRASILEIRO

O Brasil apresenta um cenário muito favorável ao uso de REM de solo, tanto pelas suas características geológicas quanto pela conjuntura agrícola e regulatória recente. A vasta disponibilidade de rochas com potenciais agronômicos, fornece uma base sólida para o desenvolvimento destes insumos alternativos que favorecem a liberação gradual de macro e micronutrientes, promovendo o manejo mais sustentável da fertilidade do solo em ambientes tropicais.

Segundo o Sistema Integrado de Produtos e Estabelecimentos Agropecuários (SIPEAGRO), sistema eletrônico do MAPA, entre os anos de 2019 e 2023, foi possível observar um crescimento expressivo na produção (Tabela 1) e na formalização do setor de remineralizadores no Brasil. Um aspecto interessante refere-se ao índice de produtos registrados quando comparados aos que ainda não possuem o registro no MAPA. Essa relação era de 40% no biênio de 2019/2020, 68% em 2021, de 73% em 2022 e de 82% em 2023. O aumento no número de estabelecimentos que atendem a legislação pode indicar que as empresas estão buscando adequar-se às normas estabelecidas na IN 05/2016, pois vislumbram oportunidades econômicas e produtivas com a obtenção do registro (MARTINS et al., 2023).

Os dados compilados por Martins et al. (2023) indicam que a expansão do setor está intimamente relacionada a uma crescente demanda por alternativas aos fertilizantes solúveis convencionais, cuja cadeia produtiva no Brasil ainda depende fortemente da importação. A utilização de remineralizadores, além de reduzir essa dependência, favorece práticas de manejo mais integradas aos princípios da agroecologia e da agricultura regenerativa, contribuindo para a resiliência produtiva e a segurança alimentar.

Tabela 1. Produção anual de remineralizadores e fertilizantes minerais simples de composição silicática para o período de 2019 e 2023.

Produção de remineralizadores e fertilizantes silicatados (toneladas por ano)						
Estado	2019	2020	2021	2022	2023*	TOTAL
Minas Gerais	278.492	427.116	862.841	1.798.383	686.522	4.053.354
Goiás	349.500	516.500	367.320	559.234	227.550	2.020.105
São Paulo	63.300	181.000	210.650	193.000	131.907	779.857
Paraná	64.500	132.500	164.987	229.650	130.900	722.537
Rio Grande do Sul	99.000	151.000	93.000	129.000	219.000	691.000
Tocantins	33.000	80.000	18.000	38.200	30.000	199.200
Mato Grosso do Sul	15.000	37.000	33.585	51.758	47.500	184.843
Bahia	18.000	34.000	8.812	26.174	8.346	95.331
Maranhão	2.000	6.000	15.000	61.000	2.209	86.209
Santa Catarina	4.000	2.752	14.500	38.000	20.000	79.252
Mato Grosso	3.000	3.000	5.000	10.000	8.000	29.000
Pernambuco	0	0	0	0	200	200
TOTAL	929.792	1.570.868	1.793.696	3.134.399	1.512.134	8.940.889

Fonte: elaborada a partir dos dados de 2019 e 2020 do Anuário Mineral Brasileiro de Não Metálicos (Brasil, 2021) ABREFEN, Embrapa Cerrados, MME e de Martins et al. (2023).

* Dados parciais

Contudo, o fortalecimento dessa cadeia produtiva ainda enfrenta desafios estruturais. Entre os principais obstáculos identificados no estudo estão a necessidade de ampliação da capacidade analítica dos laboratórios nacionais, o desenvolvimento de métodos de avaliação agrônoma adaptados à liberação lenta dos nutrientes presentes nas rochas, a capacitação técnica de profissionais e agricultores, e o fomento a políticas públicas regionais que valorizem cadeias curtas de produção e distribuição (MARTINS et al., 2023; CARMO et al., 2019).

Nesse contexto, o Brasil se posiciona como um dos países com maior potencial para liderar globalmente a agenda da remineralização de solos, graças à sua diversidade geológica, à escala de sua agricultura e ao arcabouço normativo em consolidação. Ao integrar ciência, política pública e inovação tecnológica, os remineralizadores podem desempenhar um papel estratégico na transição para sistemas agroalimentares mais sustentáveis e autônomos.

3.4 FERTILIDADE DO SOLO: UMA ABORDAGEM SISTÊMICA E CONTEMPORÂNEA

A fertilidade do solo constitui um dos conceitos centrais da ciência do solo e pode ser definida, em sua concepção clássica, como a capacidade do solo de fornecer nutrientes essenciais às plantas em quantidades e proporções adequadas, garantindo seu crescimento e desenvolvimento (NOVAIS et al., 2007). No entanto, essa definição tem sido progressivamente

ampliada, incorporando uma visão mais integradora, na qual a fertilidade é entendida como uma propriedade dinâmica e emergente do sistema solo (ANGHINONI et al., 2021).

Tradicionalmente, a fertilidade do solo foi abordada sob uma perspectiva predominantemente química, centrada na disponibilidade de nutrientes e em atributos como pH, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases e teor de matéria orgânica. Esses fatores controlam diretamente os processos de adsorção, dessorção e solubilidade dos nutrientes, influenciando sua disponibilidade para absorção pelas plantas (NOVAIS et al., 2007). Em solos tropicais altamente intemperizados, como os predominantes no Brasil, a baixa CTC e a elevada fixação de fósforo representam limitações importantes à fertilidade natural, exigindo estratégias de manejo específicas (RONQUIM, 2020).

Entretanto, a fertilidade do solo não pode ser compreendida de forma isolada apenas sob o ponto de vista químico. A estrutura física do solo exerce papel determinante nesse contexto, uma vez que atributos como densidade, porosidade, agregação e capacidade de retenção de água condicionam o crescimento radicular, a infiltração de água e a difusão de gases. Solos fisicamente degradados, especialmente aqueles sujeitos à compactação, podem apresentar limitações severas ao desenvolvimento das plantas, mesmo quando os níveis de nutrientes são considerados adequados (ANGHINONI et al., 2021).

Nos últimos anos, a dimensão biológica da fertilidade do solo tem recebido crescente atenção, sendo reconhecida como componente fundamental para a sustentabilidade dos sistemas produtivos. A biota do solo, composta por microrganismos e macrofauna, desempenha funções essenciais como a decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, fixação biológica de nitrogênio e formação de agregados estáveis. Esses processos contribuem diretamente para a manutenção da estrutura do solo e para a disponibilidade gradual de nutrientes, reforçando o caráter integrado da fertilidade (FAO, 2017).

Nesse contexto, surge o conceito de fertilidade sistêmica do solo, no qual a fertilidade é interpretada como resultado da auto-organização do sistema solo em resposta ao manejo adotado e às interações entre seus componentes físicos, químicos e biológicos. Segundo Anghinoni et al. (2021), essa abordagem permite compreender que solos com características químicas semelhantes podem apresentar desempenhos agronômicos distintos, em função de diferenças estruturais e biológicas, evidenciando que a fertilidade é uma propriedade emergente do sistema.

Além disso, a fertilidade do solo está intimamente relacionada ao conceito de qualidade do solo e à provisão de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, a regulação do ciclo de nutrientes e a manutenção da biodiversidade. Dessa forma, a fertilidade ultrapassa a

dimensão estritamente agronômica, assumindo papel estratégico na sustentabilidade ambiental e na segurança alimentar global (FAO, 2017).

Outro aspecto relevante é que a fertilidade do solo deve ser entendida como uma propriedade relativa, dependente do sistema de uso, das condições climáticas e das exigências das culturas. Assim, um solo considerado fértil em determinado contexto pode não apresentar o mesmo desempenho em outro, o que reforça a necessidade de manejo específico e adaptado às condições locais (RONQUIM, 2020).

Por fim, o manejo da fertilidade do solo assume papel central na agricultura contemporânea, sendo fundamentado em práticas como adubação equilibrada, uso de corretivos, incremento da matéria orgânica, rotação de culturas e conservação do solo. Essas estratégias visam não apenas maximizar a produtividade, mas também manter ou melhorar a qualidade do solo ao longo do tempo, garantindo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (NOVAIS et al., 2007; ANGHINONI et al., 2021).

3.5 REMINERALIZADORES E FERTILIZANTES A BASE DE NPK NO CONTEXTO DA FERTILIDADE DO SOLO

No contexto da fertilidade do solo, os insumos utilizados para o suprimento de nutrientes podem ser classificados, de forma geral, em fertilizantes minerais solúveis, como os formulados à base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), e insumos de liberação lenta, como os remineralizadores de solo. Esses grupos apresentam mecanismos de atuação distintos, porém complementares, sendo fundamentais para a construção e manutenção da fertilidade em sistemas agrícolas tropicais (NOVAIS et al., 2007; HAVLIN et al., 2014).

Os fertilizantes NPK caracterizam-se pela elevada solubilidade e rápida disponibilização de nutrientes na solução do solo, promovendo respostas imediatas no crescimento vegetal. Essa eficiência agronômica, entretanto, pode ser limitada por processos como lixiviação, volatilização e fixação, especialmente em solos altamente intemperizados, o que reduz a eficiência de uso dos nutrientes (HAVLIN et al., 2014; MALAVOLTA, 2006). Além disso, o uso intensivo e desbalanceado desses insumos pode resultar em impactos ambientais, como a eutrofização de corpos d'água e emissões de gases de efeito estufa (FAO, 2017).

Em contraste, os remineralizadores de solo consistem em materiais de origem mineral finamente moídos, cuja liberação de nutrientes ocorre de forma gradual por meio de processos de intemperismo químico e biológico. Segundo van Straaten (2007), esses materiais atuam como fontes multielementares, fornecendo macro e micronutrientes, além de contribuir para o reequilíbrio geoquímico do solo. Theodoro et al. (2021) destacam que os remineralizadores

desempenham papel relevante na construção da fertilidade a longo prazo, sobretudo em solos tropicais pobres em minerais primários.

Do ponto de vista químico, os fertilizantes NPK promovem aumento imediato da concentração de nutrientes na solução do solo, impactando diretamente a absorção pelas plantas. Por outro lado, os remineralizadores contribuem para o aumento gradual da capacidade de troca de cátions (CTC), fornecimento contínuo de nutrientes e melhoria do tamponamento do solo, além de disponibilizarem elementos como silício, cálcio e magnésio (VAN STRAATEN, 2007; THEODORO et al., 2021). Em sistemas tropicais, essa liberação progressiva é particularmente relevante para reduzir perdas e aumentar a eficiência do uso de nutrientes.

Na dimensão física, os remineralizadores podem favorecer a formação e estabilidade de agregados do solo, devido à interação entre minerais secundários, óxidos e matéria orgânica, resultando em melhorias na estrutura, porosidade e retenção de água (BRADY; WEIL, 2017). Já os fertilizantes solúveis apresentam efeitos indiretos sobre os atributos físicos, geralmente associados ao aumento da biomassa vegetal e ao aporte de resíduos orgânicos (ANGHINONI et al., 2021).

Sob a perspectiva biológica, a aplicação de remineralizadores pode estimular a atividade microbiana e a diversidade funcional do solo, uma vez que a liberação gradual de nutrientes favorece processos biogeoquímicos como a mineralização e a solubilização de nutrientes (BENITES et al., 2010). Em contrapartida, a aplicação intensiva de fertilizantes solúveis pode alterar a dinâmica microbiológica, especialmente quando associada a baixos teores de matéria orgânica (FAO, 2017).

A integração entre fertilizantes NPK e remineralizadores tem sido apontada como estratégia promissora para o manejo sustentável da fertilidade do solo. Enquanto os fertilizantes solúveis atendem à demanda imediata das culturas, os remineralizadores contribuem para a construção da fertilidade a médio e longo prazo, promovendo maior resiliência do sistema (THEODORO et al., 2021; HINSINGER et al., 2011). Essa abordagem está alinhada ao conceito de fertilidade sistêmica, no qual a produtividade agrícola resulta da interação entre processos químicos, físicos e biológicos, modulados pelo manejo (ANGHINONI et al., 2021).

Além disso, o uso de remineralizadores tem sido associado à redução da dependência de insumos importados e ao fortalecimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis, especialmente em países tropicais com grande disponibilidade de recursos minerais (VAN STRAATEN, 2007). Nesse sentido, esses insumos representam uma alternativa estratégica para a agricultura brasileira, contribuindo para a intensificação sustentável da produção.

Em suma, destaca-se que os remineralizadores não substituem integralmente os fertilizantes NPK, mas devem ser considerados como componentes de um manejo integrado da fertilidade do solo. A combinação equilibrada entre fontes de liberação rápida e lenta, associada a práticas conservacionistas e ao incremento da matéria orgânica, é essencial para garantir a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (NOVAIS et al., 2007; BRADY; WEIL, 2017).

3.6 REMINERALIZADORES E O SOLO

3.6.1 Efeitos Químicos

Alguns estudos demonstram que a aplicação de remineralizadores de solos trazem benefícios, melhorando condições do solo para o crescimento das plantas, com incrementos no pH do solo, neutralização do alumínio trocável, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de Si em diferentes classes de solos (MELO et al., 2012; MANCUSO et al., 2014), assim como aumento de macro e micronutrientes (SHAMSHUDDI & ANDA, 2012; SILVA et al., 2012; MACHADO et al., 2016; RAMOS et al., 2017; SOUZA et al., 2018; TAVARES et al., 2018; RAMOS et al., 2020; DALDORA et al., 2020; BASAK et al., 2021), disponibilização de nutrientes não presentes em fertilizantes solúveis (ALOVISI et al., 2020), aplicações com menor impacto ambiental (VAN STRAATEN, 2006) e incremento na produtividade das lavouras (THEODORO, 2006; SILVA et al., 2019).

As pesquisas de Leonardos et al. (1976) e Theodoro & Leonardos (2006) e Theodoro, et al. (2013), identificaram que a remineralização fornece os nutrientes demandados para o pleno crescimento das plantas, por um intervalo de tempo de até cinco anos posteriores a sua incorporação aos solos. Como as plantas absorvem somente aquilo que necessitam para o seu desenvolvimento, os demais nutrientes ficam retidos na estrutura cristalina das argilas que compõem os remineralizadores adicionados aos solos, formando uma espécie de estoque de nutrientes, os quais são disponibilizados de forma gradual. Estudos mostram que agrominerais silicáticos são fontes de K (NOGUEIRA et al., 2021; SANTOS et al., 2021; SORATTO et al., 2021ab).

Estudos sobre alterações químicas em solos tropicais com o uso de remineralizadores conduzidas por SANTANA et al. (2025), demonstraram melhorias significativas nos atributos químicos de Latossolos, causando a elevação do pH (em CaCl_2 e H_2O), a redução do alumínio trocável (Al^{3+}), aumento da saturação por bases (V%) e da soma de bases (SB). Esses efeitos foram comparáveis ou superiores aos observados com o uso de calcários tradicionais dolomítico e/ou calcítico, reforçando seu potencial como corretivo de acidez e fonte que disponibiliza

gradualmente os nutrientes. Contudo, SANTANA et al. (2025), evidenciaram em seus estudos a maior eficácia nas camadas superficiais (0-20 cm de profundidade), indicando a necessidade de estratégias de manejos complementares, como a incorporação mecânica ou aplicações recorrentes, para atingir camadas subsuperficiais.

Muitas pesquisas se concentram somente em atributos químicos do solo fáceis de se quantificar, como por exemplo macro e micronutrientes, pH e soma de bases. Mas ainda se tem muito para explorar com a adoção do uso de pós de rochas como remineralizadores, um exemplo de estudo, é o uso de pó de rocha para a remoção e fixação de gás carbônico no ambiente agrícola, através do intemperismo dos minerais de silicato (SCHUILING e KRIJGSMAN, 2006; HANGX e SPIRES, 2009; GUDBRANDSSON et al., 2011; BEERLING et al., 2018).

Em estudo conduzido por Soares et al. (2021) no bioma Cerrado, em Latossolo, com sistemas agroflorestais associados à aplicação de remineralizadores, foi observado maior crescimento e, consequentemente, maior a captura de CO₂ em comparação com a testemunha, já que houve maior alteração na química do solo através do aumento gradual do pH, aumento da CTC e pela liberação e disponibilidade de macro e micronutrientes, o que, possivelmente, potencializou o crescimento vegetal. O uso dos remineralizadores pode aumentar a captura de CO₂ atmosférico, através da formação de microagregados carbonatados no solo (CHURCHMAN et al., 2020) ou potencializando o crescimento de espécies florestais (SOARES, 2018), o que demonstra o potencial de uso dos remineralizadores em projetos de créditos de carbono e de mitigação climática. Entretanto, é importante ressaltar que as pesquisas e dados obtidos nesta temática são ainda bastante recentes, carecendo de mais pesquisas para se obter dados mais precisos.

3.6.2 Efeitos Físicos e Biológicos

Os solos tropicais, altamente intemperizados, apresentam características ideais para a remineralização, como a baixa CTC e limitada reserva de nutrientes nos minerais que, somadas às condições de umidade, temperatura e potencial de atividade biológica, criam fatores favoráveis para o intemperismo na escala de tempo agrônômico dos remineralizadores aplicados (EDWARDS et al., 2017). O intemperismo melhorado em solos tropicais fundamenta-se em aportar rochas silicáticas com minerais pouco alterados, e que sob a ação biológica do solo sejam capazes de restaurar a matriz organomineral, aumentando suas funcionalidades para o desenvolvimento das culturas. O intemperismo melhorado de solos tropicais oferece um ambiente que permite às culturas recorrerem aos próprios mecanismos evolutivos para acessar nutrientes e outras funções essenciais na interação raízes - microrganismos - minerais. O

processo de biointemperismo é o principal mecanismo de transformação mineral na escala de tempo agrônômica, onde podem ser caracterizados os efeitos diretos descritos anteriormente.

Vários autores mostram que determinados minerais, como é o caso da biotita, dependem do biointemperismo para a transformação mineralógica. Krahel et al. (2022) mostram que a ação da rizosfera transforma biotita em hidrobiotita, um intermediário da vermiculita, contribuindo para a geração de CTC de origem mineral, que é estável no longo prazo.

Na maioria dos remineralizadores são gerados minerais de baixa cristalinidade, com elevada superfície específica e carga superficial (FINLAY et al., 2020; SILVA; FERREIRA; AZEVEDO, 2021). E quando o remineralizador é aplicado ao solo a superfície específica é aumentada, criando uma grande ampliação de nichos para interações minerais-microrganismos, o que resulta no aumento de raízes das culturas (MARTINS et al., 2023).

Estas superfícies de interação ativam a reestruturação das comunidades microbianas do solo e o estímulo à oferta dos exsudatos das raízes. O aumento de exsudatos das raízes significa oferta de nutrientes para os microrganismos, por sua vez, o aumento de microrganismos intensifica os mecanismos de biodissolução ou biointemperismo dos minerais adicionados (MARTINS et al., 2023). Outras fontes de C orgânico oferecem energia para a ativação biológica, colaborando para o biointemperismo dos minerais, aumentando a disponibilização de nutrientes e a formação de minerais secundários, em geral, ricos em superfície ativa, e contribuindo para a formação de microagregados, afetando diretamente a parte física do solo (MARTINS et al., 2023).

Uma vez que são formados novos minerais de alta cristalinidade, como é o caso da transformação da biotita em hidrobiotita e vermiculita, e de baixa cristalinidade a partir de outros minerais silicáticos, nutrientes são liberados no processo de intemperismo dos remineralizadores. O aumento da diversidade mineral também contribui para a diversificação do microbioma, amplia a oferta de microrganismos funcionais do solo a serem recrutados para as rizosferas das culturas e cria um processo que se retroalimenta com o intemperismo gradual dos minerais silicáticos.

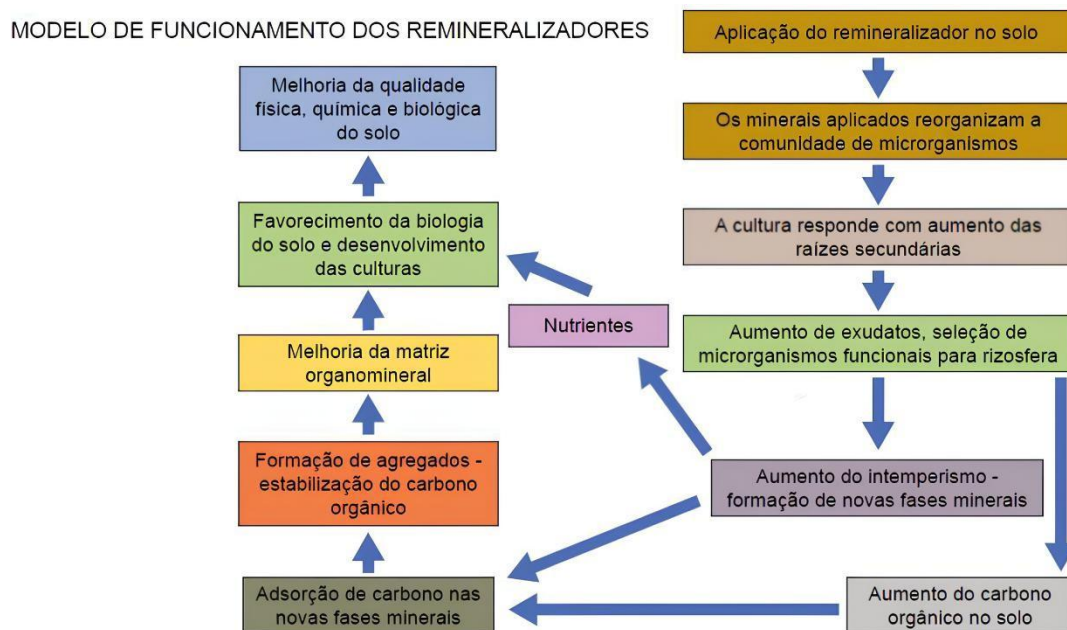
Uma hipótese que precisa ser testada é que o uso de remineralizadores resgata as habilidades da maioria das culturas na interação com os minerais semelhantes aos ambientes de seus centros de origem. Se isto for confirmado, será possível desenvolver ambientes agrícolas customizados para os sistemas produtivos em relação aos aspectos de funcionamento biogeoquímico. Segundo Martins et al. (2023) as pesquisas e revisões sobre o tema orientam-se principalmente na disponibilização de nutrientes na perspectiva tradicional de fertilidade, faltando abordagens integradas que incluam a interação plantas-microrganismos-minerais para explicar os benefícios dos agrominerais silicáticos nos solos agrícolas, principalmente em

ambientes tropicais. No sistema solo-planta é fundamental considerar o papel central da microbiota nas funções fundamentais requeridas pela planta (BENDER; WAGG; HEIJDEN, 2016; GIANINAZZI et al., 2010).

A utilização desses minerais provenientes da remineralização promove a produtividade do solo tanto quimicamente, com a disponibilização dos nutrientes, quanto fisicamente, melhorando as propriedades físicas do solo, como a capacidade de retenção de água, disponibilidade de água, aeração e suporte estrutural (VAN STRAATEN, 2022). Diferente do fertilizante químico de alta solubilidade que é concentrado no sulco de semeadura da planta, o que não estimula as raízes a buscarem o nutriente, o remineralizador estimula a planta a emitir raiz e capturar os nutrientes, além da possibilidade de influenciar na densidade de esporos e colonização de raízes por fungos micorrízicos arbusculares (EDWARD, 2017).

O manejo regenerativo sustentável nas condições tropicais permite transformar a remineralização num processo de intemperismo melhorado promovido pelo sistema biológico agrícola, gerando minerais secundários com superfícies ativas e liberação de nutrientes no sistema. Os minerais secundários interagem com os compostos orgânicos provenientes diretamente das plantas, processados pelos microrganismos, e ainda com o material microbiano morto, essa interação gera os microagregados, a matriz organomineral do solo e a base para manter o C orgânico no solo (LEHMANN; KLEBER, 2015).

A adição de remineralizadores inicia um processo em que minerais, microrganismos e plantas se complementam para oferecer funções e serviços fundamentais ao sistema (Figura 3). O aumento de exsudatos das raízes significa oferta de nutrientes para os microrganismos, por sua vez, o aumento de microrganismos intensifica os mecanismos de biodissolução ou biointemperismo dos minerais adicionados. Os mecanismos envolvem a geração de condições ácidas por meio da síntese de ácidos orgânicos e inorgânicos, da produção de polissacarídeos extracelulares (biofilmes), da quelação, das reações Eh-pH, da segregação de ácidos orgânicos e de ligantes orgânicos – todos contribuindo para o intemperismo dos minerais (MARTINS et al., 2023).

Figura 3. Modelo de funcionamento dos remineralizadores.

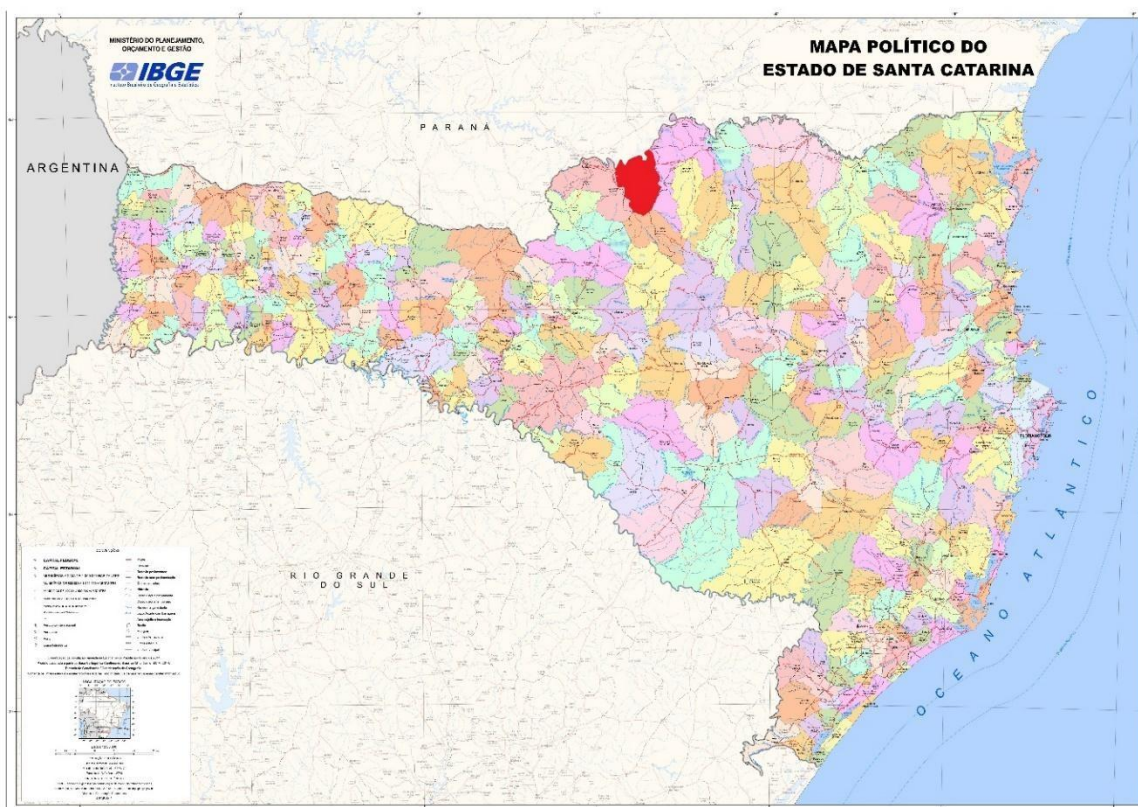
Fonte: MARTINS, HARDOIM e MARTINS (2023).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada em três áreas rurais com solos de usos distintos e idades cronológicas diferentes em relação ao uso do remineralizador. Duas áreas estão localizadas no estado de Santa Catarina e uma no estado do Paraná. Em Santa Catarina (Figura 4), as duas áreas de estudo estão localizadas no município de Irineópolis, no Planalto Norte do estado, aproximadamente 400 Km da capital Florianópolis, no Assentamento Manoel Alves Ribeiro – MIMO e na comunidade Colônia Escada.

Figura 4. Mapa político do estado de Santa Catarina. Em vermelho localização do município de Irineópolis. Fonte IBGE adaptado.



O município de Irineópolis, possui altitude média de 762 metros, pluviosidade média anual de 1512 mm e temperatura média anual de 17,5 °C. Os solos ocorrentes no Planalto Norte Catarinense apresentam propriedades físicas e químicas condizentes com as variações do material de origem dos quais foram desenvolvidos. Os solos predominantes em Irineópolis estão diretamente relacionados à sua geologia, especialmente à presença de basaltos da Formação Serra Geral e de rochas sedimentares da Bacia do Paraná.

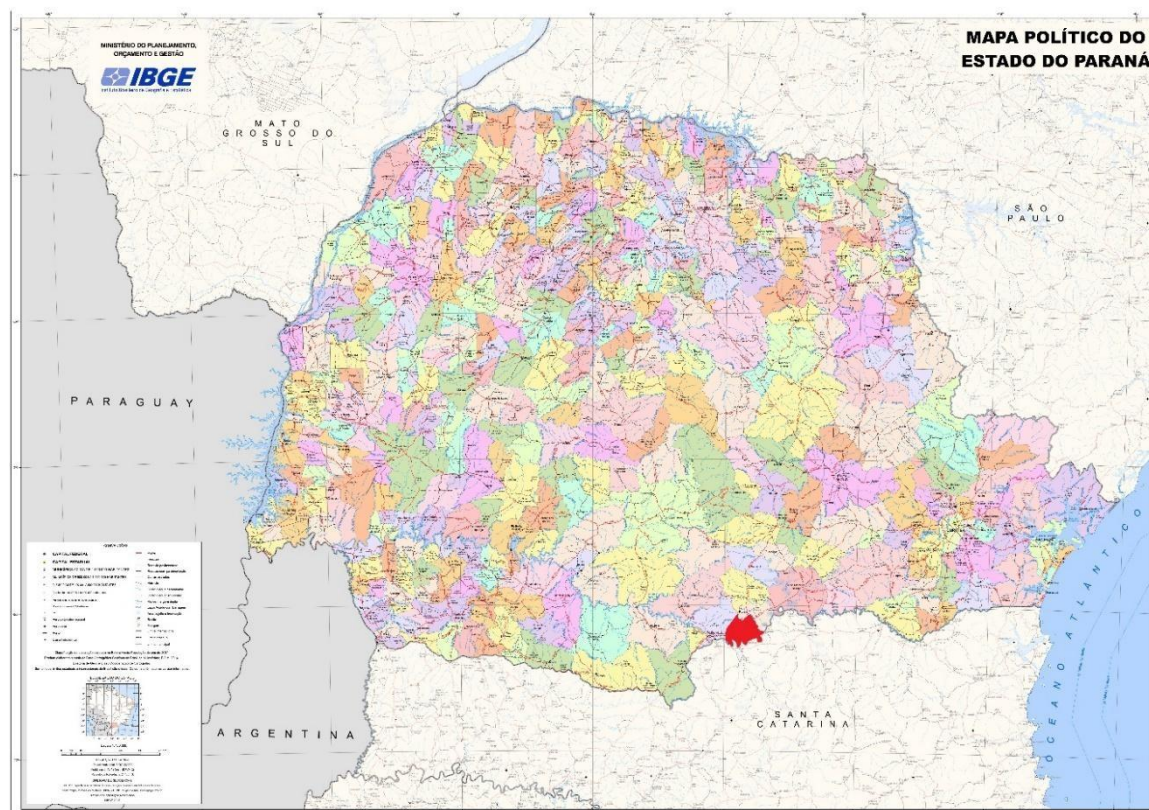
Os solos predominantes nas superfícies de relevo ondulado e forte ondulado do Planalto Norte Catarinense são os Cambissolos Húmicos Alumínicos, Cambissolos Háplicos Alumínicos e os Neossolos Litólicos Húmicos. Os Latossolos Vermelhos Húmicos também ocupam áreas expressivas nesta região, ocorrendo geralmente nas áreas de relevo suavemente ondulado nos divisores de água. Gleissolos Melânicos e Gleissolos Háplicos predominam nas áreas de relevo plano, às margens dos principais rios que cortam a região, ocupando áreas de várzeas (EMBRAPA, 2004).

O clima úmido e frio da região favoreceu a intensa lixiviação de bases, condicionando a formação de solos ácidos e com alta acumulação de matéria orgânica nos horizontes superficiais. Ribeiro et al. (2013) ainda relatam que a mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Norte Catarinense mostrou a predominância de caulinita e consideráveis quantidades de gibbsita, indicando ambiente de forte intemperização, mas preservando ainda quantidades

variáveis de argilominerais 2:1, que foram responsáveis por um ligeiro aumento da CTC dos solos.

No Paraná (Figura 5), a área de estudo se localiza no município de Paula Freitas na região sul do estado, com aproximadamente 220 Km de distância da capital Curitiba.

Figura 5. Mapa político do estado de Paraná. Em vermelho localização do município de Paula Freitas. Fonte IBGE adaptado.



O município de Paula Freitas, onde se encontra uma das três áreas de estudo, possui altitude média de 754 metros, com pluviosidade média anual de 1700 mm e temperatura média anual de 18 °C. Os solos predominantes em Paula Freitas estão diretamente relacionados à geologia local, especialmente à presença de basaltos da Formação Serra Geral e de rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Os solos predominantes no município são Cambissolos Húmicos, Nitossolos, Neossolos e Latossolos. Os perfis de solo apresentam propriedades físicas e químicas condizentes com as variações do material de origem dos quais foram desenvolvidos.

O município de Paula Freitas está inserido na Bacia do Paraná, composta por rochas sedimentares e rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. O clima úmido e frio da região também favoreceu a intensa lixiviação de bases, condicionando a formação de solos ácidos e com alta acumulação de matéria orgânica nos horizontes superficiais.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

Foram consideradas três propriedades rurais neste estudo: (i) Assentamento Manoel Alves Ribeiro – MIMO; (ii) Colônia Escada; e (iii) Área Paula Freitas. As análises das três áreas agrícolas revelaram um padrão de semelhança em certas práticas, apesar das variações específicas de cada local. Em todos os casos, a comparação na propriedade foi realizada entre duas parcelas distintas com e sem aplicação de remineralizador, o que permitiu avaliar o impacto de diferentes manejos. O uso de calcário se destaca como uma prática comum em todas as propriedades, embora com cronogramas e quantidades distintas.

Os protocolos de manejo adotados nas unidades produtivas não foram definidos em condições estritamente controladas de experimentação, mas sim construídos em um contexto participativo, refletindo a dinâmica real dos sistemas produtivos. Nesse sentido, as decisões relacionadas ao uso de insumos foram influenciadas diretamente pelos agricultores, considerando suas condições operacionais, econômicas e logísticas.

Especificamente em relação à aplicação de remineralizadores, as doses utilizadas não seguiram um delineamento experimental previamente estabelecido. A definição das quantidades foi realizada pelos próprios agricultores, com base em orientações técnicas fornecidas por representantes comerciais do produto, bem como pela disponibilidade de aquisição no momento da implementação. Dessa forma, as doses aplicadas variaram entre as unidades produtivas, refletindo tanto as recomendações comerciais quanto as limitações práticas enfrentadas pelos produtores.

Da mesma forma, a aplicação de gesso agrícola é ausente em algumas parcelas. O cultivo de milho e soja é comum, e a produtividade dessas culturas foi um ponto central de avaliação. As diferenças mais significativas, por sua vez, estão no uso de insumos como o remineralizador, adubação sintética e orgânica, e no manejo mecânico do solo, que variam de acordo com a estratégia adotada em cada área para otimizar a produção. A seguir, são apresentadas as características de cada propriedade.

4.2.1 Assentamento Manoel Alves Ribeiro – MIMO

No Assentamento MIMO (Figura 6), localizado em Irineópolis, a área serviu de cenário para um estudo comparativo entre duas parcelas agrícolas, com remineralizador, cujas coordenadas são 26°15'19.41"S 50°46'41.87"O e sem o remineralizador, cujas coordenadas são 26°15'19.10"S 50°46'39.97"O, que apesar da proximidade física, adotam manejos completamente diferentes. A principal distinção reside no uso de um remineralizador, prática adotada desde 2007 na primeira parcela, que recebeu 3 toneladas por hectare a cada dois anos.

A parcela vizinha, no entanto, não faz uso desse pó de rocha. A aplicação de calcário ocorreu em ambas as áreas apenas uma vez, em 2006 (5 toneladas por hectare), e nenhuma das duas utiliza gesso agrícola.

As parcelas avaliadas estão sob um solo Latossolo Vermelho, apresentam textura franco-argilosa e as diferenças no manejo do solo e na adubação são notáveis. Na parcela com remineralizador, a estratégia é orgânica, com adubação intensiva usando compostos da propriedade, sem qualquer fertilizante químico-sintético. O preparo do solo é convencional, com revolvimento anual por arado e grade. Para o inverno, há uma adubação verde com uma mistura de 50 quilogramas de aveia, 20 quilogramas de nabo forrageiro, 20 quilogramas de ervilhaca e 20 quilogramas de centeio. Já na parcela sem remineralizador, a abordagem é distinta: utiliza 200 kg por hectare de NPK (4-14-8) exclusivamente na cultura da soja, não emprega adubação orgânica, e adota o plantio direto, com o solo em pousio no inverno e submetido à queima da vegetação das plantas espontâneas.

Figura 6. Demarcação das áreas de estudo com o remineralizador e sem o remineralizador realizadas no Assentamento MIMO em Irineópolis em Santa Catarina.



Fonte: O autor

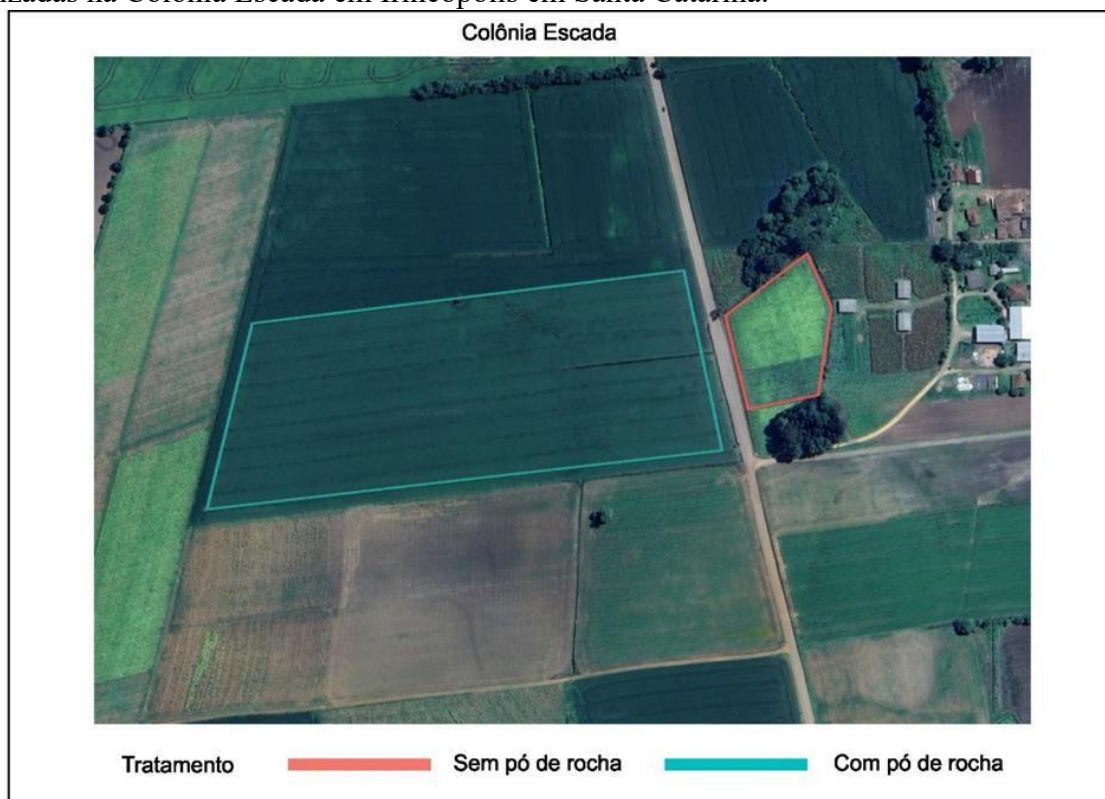
O contraste nos sistemas de cultivo também é evidente. A parcela com remineralizador cultiva feijão, milho, mandioca e batata-doce, priorizando a rotação entre feijão e milho. Por outro lado, a parcela sem remineralizador alterna entre feijão, milho e soja.

Essa diferença de manejo se reflete diretamente na produtividade média. A parcela com remineralizador registra 25 sacas por hectare de feijão e 50 sacas por hectare de milho. Em contrapartida, a parcela sem remineralizador apresenta rendimentos superiores: 40 sacas por hectare de feijão, 60 sacas por hectare de milho e 40 sacas por hectare de soja. Os resultados sugerem que as práticas de adubação química e plantio direto, na parcela sem remineralizador, superaram em produtividade a estratégia orgânica e de revolvimento do solo da parcela vizinha, evidenciando o impacto significativo das escolhas agrícolas no rendimento final das culturas.

4.2.2 Colônia Escada

Na Colônia Escada (Figura 7), em Irineópolis, um estudo comparativo também foi realizado em duas parcelas, ambos em Cambissolo Húmico, com o remineralizador, cujas coordenadas são 26°18'38.09"S 50°46'57.23"O, e sem o remineralizador, cujas coordenadas são 26°18'36.57"S 50°46'55.22"O, com a única diferença significativa sendo a aplicação de remineralizador.

Figura 7. Demarcação das áreas de estudo com o remineralizador e sem o remineralizador realizadas na Colônia Escada em Irineópolis em Santa Catarina.



Fonte: O autor

Enquanto uma parcela recebeu o insumo em 2020 (2,5 t/ha) e 2022 (2,3 t/ha), a outra não teve essa aplicação. Os demais manejos foram mantidos rigorosamente semelhantes, o que tornou a comparação direta. Ambas as parcelas avaliadas apresentam textura franco-argilosa e usaram calcário calcítico, em 2019 (2,7 t/ha) e em 2023 (2 t/ha), adubação sintética para a cultura do tabaco, 550 kg por hectare de NPK (15-00-15) e 250 kg por hectare de Ureia, e para a cultura do milho 200 kg por hectare de NPK (8-20-20) e 200 kg por hectare de Ureia. A adubação orgânica foi realizada com cama de aviário de peru (Ferticel) usado em 2021, nas mesmas quantidades para as culturas de tabaco (550 kg por hectare) e milho (200 kg por hectare). O manejo de plantas de cobertura no inverno e no verão também foram idênticos, utilizando para a cobertura de inverno a aveia e o centeio na proporção de 60 quilogramas para cada, e no verão se utiliza o capim sudão na quantidade de 60 quilogramas de sementes. O manejo mecânico do solo também é idêntico nas duas áreas, utilizando grade e subsolador nos anos de 2021, 2022 e 2023.

Como resultado da similaridade quase total dos manejos, não foram observadas diferenças contrastantes na produtividade entre as duas parcelas. Os dados mostram que os rendimentos foram praticamente idênticos ao longo dos anos avaliados. Em 2021, por exemplo, a produtividade da soja foi de 73,4 sc/ha com o remineralizador e 74,2 sc/ha sem ele. No milho, os resultados foram de 144,8 sc/ha e 143,6 sc/ha, respectivamente. Para o tabaco, a diferença também foi mínima, com 2.735 kg/ha na parcela com o remineralizador e 2.748 kg/ha na sem. Essa tendência de rendimentos muito próximos se manteve nos anos seguintes. Em 2022, a soja rendeu 77,1 sc/ha com remineralizador e 76,3 sc/ha sem. No milho, a produtividade foi de 134,2 sc/ha e 135,1 sc/ha. Para o tabaco, os valores foram de 2.893 kg/ha e 2.885 kg/ha. Já em 2023, a soja rendeu 74,7 sc/ha com remineralizador e 75,5 sc/ha sem, enquanto o milho registrou 138,6 sc/ha e 137,8 sc/ha. Os resultados de 2024 também seguiram o mesmo padrão, com a soja em 74,8 sc/ha e 74,0 sc/ha, o milho em 142,4 sc/ha e 143,5 sc/ha, e o tabaco em 2.762 kg/ha e 2.743 kg/ha. Esses dados sugerem que o remineralizador, neste cenário específico de manejo uniforme, não foi o fator decisivo para o aumento da produtividade.

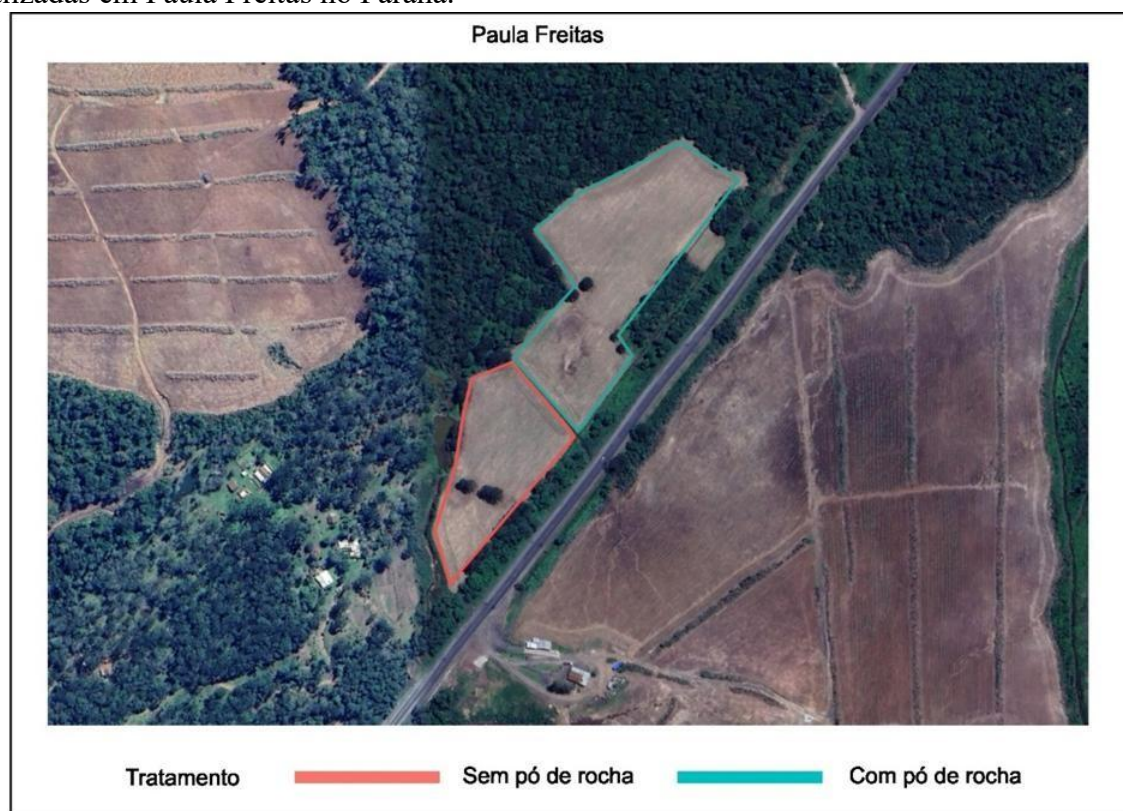
4.2.3 Paula Freitas

Na área de Paula Freitas (Figura 8), duas parcelas, com remineralizador, cujas coordenadas são 26°08'51.13"S 50°52'26.89"O, e sem o remineralizador, cujas coordenadas são 26°08'51.86"S 50°52'27.95"O, foram comparadas para analisar o impacto de manejos distintos, com destaque para a aplicação de remineralizador e gesso agrícola. A parcela com remineralizador utiliza anualmente 1 tonelada por hectare desde 2010, e recebe gesso granulado

(500 kg/ha) anualmente desde 2018. A parcela sem remineralizador não utiliza nenhum desses insumos, mas adota o pastejo de gado na cobertura de inverno, o que contribui com adição de matéria orgânica.

Ambas as parcelas avaliadas apresentam textura franco-argilosa, sendo o solo classificado como Gleissolo Melânico, e usam adubação sintética, mas com doses diferentes. Para a soja, a parcela com remineralizador recebe 200 kg/ha de NPK (2-20-20) mais 200 kg de cloreto de potássio por hectare, enquanto a outra parcela sem o remineralizador recebe 300 kg/há de NPK (2-20-20) mais 200 kg de cloreto de potássio por hectare. No milho, as doses também variam: 350 kg/ha de NPK (10-20-20) e 350 kg/ha ureia na parcela com remineralizador, contra 400 kg/ha de NPK (10-20-20) e 400 kg/ha ureia na parcela sem.

Figura 8. Demarcação das áreas de estudo com o remineralizador e sem o remineralizador realizadas em Paula Freitas no Paraná.



Fonte: O autor

Embora ambas as áreas pratiquem o plantio direto e usem aveia e azevém como cobertura de inverno, os manejos do solo e a rotação de culturas são diferentes. A parcela sem remineralizador realiza subsolagem e gradagem na sequência de 2 a 3 anos, já na parcela com o remineralizador somente é utilizada uma grade niveladora para incorporar as sementes de plantas de cobertura. A sucessão de milho e soja também varia, com o milho plantado a cada 4 anos na primeira parcela e a cada 5 anos na segunda.

A análise da produtividade da soja, a cultura predominante, indica que, apesar de todos esses manejos distintos, os rendimentos foram muito similares. A parcela com remineralizador obteve 71 sc/ha em 2020, 74 sc/ha em 2021 e 71,5 sc/ha em 2022. Na parcela sem o remineralizador, os resultados foram 73 sc/ha em 2020, 74 sc/ha em 2021 e 71 sc/ha em 2022. Esses dados mostram que as múltiplas diferenças de manejo não resultaram em uma disparidade significativa de produtividade.

4.3 BLEND MICROGABRO E LATITO

O blend 70:30 (Microgabro e Latito) é oriundo de duas pedreiras. Uma das pedreiras se encontra no estado do Paraná e outra em Santa Catarina. No Paraná, a extração é no município de Paula Freitas de onde é extraído o microgabro/diabásio, e em Santa Catarina, a extração é no município de Porto União, onde é extraído o Latito. Ambas as pedreiras são da empresa Revestical Extração e Comércio de Pedras LTDA. O processo para se obter o pó de rocha é a moagem e peneiração da rocha através de britadores e peneiras. Isso ocorre em uma das sedes da empresa em Paula Freitas.

4.4 ANÁLISES DOS PÓS DE ROCHAS

As análises do pó de rocha para ser considerado um remineralizador é de suma importância, uma vez que é necessário conhecer os teores dos elementos presentes na/nas amostra/amostras para verificar se o material se encontra dentro das especificações e garantias mínimas impostas pela IN 5/2016 do MAPA (BRASIL, 2016). Essas exigências impõem critérios rigorosos na seleção das rochas. Rochas com alto teor de quartzo, por exemplo, ou aquelas com baixa diversidade mineralógica e pouca reatividade, tendem a ser desclassificadas ou a exigir maior comprovação de sua eficácia. Já rochas como por exemplo os basaltos, sienitos, fonólitos, micaxistos e gnaisses por apresentarem maior diversidade mineral, teores significativos de potássio, cálcio e magnésio, além de boa resposta agrônômica têm sido amplamente estudadas e utilizadas como remineralizadores com base nos critérios da normativa (MARTINS et al., 2023; THEODORO et al., 2021).

Tabela 2. Comparação entre as exigências da IN 05/2016 do MAPA em comparação com o Blend 70:30, Microgabro e o Latito. Em verde os dados do blend que se enquadram dentro da IN e em vermelho os dados do blend que não se enquadram na IN.

	IN 05/2016	Blend 70:30	Microgabro	Latito
Soma de Bases				
CaO + MgO + K ₂ O	≥ 9%	9,91%	15,57%	7,44%
CaO*	N/E	5,01%	9,55%	2,98%
MgO*	N/E	2,53%	5,37%	1,28%
K ₂ O	≥ 1%	2,37%	0,65%	3,18%
Dióxido de Silício (Sílica)				
SiO ₂ Livre	≤ 25%	60,1%	51,5%	63,9%
Elementos Potencialmente Tóxicos				
As	≤ 15 ppm	2 ppm	< 1 ppm	3 ppm
Cd	≤ 10 ppm	0,04 ppm	0,08 ppm	0,04 ppm
Hg	≤ 0.1 ppm	< 0,05 ppm	< 0,05 ppm	< 0,05 ppm
Pb	≤ 200 ppm	4,5 ppm	3,8 ppm	3,4 ppm
Fósforo				
P ₂ O ₅	≥ 1%	0,28%	0,18%	0,33%
Micronutrientes				
B	≥ 0.03%	0,001%	0,001%	0,001%
Cl*	≥ 0.1%	N/A	-	-
Co	≥ 0.005%	0,00132%	0,00213%	0,00094%
Cu	≥ 0.05%	0,01569%	0,02426%	0,01168%
Fe	≥ 0.1%	4,91%	6,84%	3,97%
Mn	≥ 0.1%	0,0604%	0,0668	0,0583
Mo	≥ 0.005%	0,000073%	0,000052	0,000076
Ni	≥ 0.005%	0,00072	0,00165%	0,00028
Se	≥ 0.03%	0,0001%	0,0001%	0,0001%
Si*	≥ 0.05%	N/A	-	-
Zn	≥ 0.1%	0,0071%	0,0080	0,0067

N/E – Não Especificado N/A – Não Avaliado. Fonte: o autor.

Para o material de estudo desta pesquisa, as análises de litogeoquímica do blend 70:30, do Latito e do Microgabro (Anexo 1), a petrografia do Latito (Anexo 2) e do Microgabro (Anexo 3), o pH de abrasão do blend 70:30 (Anexo 4) e a granulometria (Anexo 5) foram cedidas para a pesquisa pela empresa Revestical Extração e Comércio de Pedras LTDA, situada no município de Paula Freitas no Paraná. Com as análises litogeoquímicas, foi confeccionado uma comparação entre a IN 05 de 2016 do MAPA e os dados litogeoquímicos do blend, do

microgabro e do latito (Tabela 2), assim como uma caracterização química do blend 70:30 (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização química do Blend 70:30.

CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅						
5,01%	2,53%	2,37%	0,28%						
Ca	Mg	K	P	S					
0,85%	0,33%	0,08%	0,12%	0,08%					
B	Co	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Se	Zn	
<10 ppm	13,2 ppm	156,9 ppm	4,91 ppm	604 ppm	0,73 ppm	7,2 ppm	<1 ppm	71 ppm	

Fonte: o autor.

A caracterização química total das rochas utilizadas como remineralizadores exige procedimentos específicos de solubilização que diferem significativamente das rotinas laboratoriais aplicadas em análises agronômicas convencionais. As três amostras de rochas foram analisadas no ano de 2023 para a caracterização química pela empresa GSG GEOSOL, Empresa brasileira, resultado de uma joint venture entre a SGS do Brasil e a Geosol Geologia e Sondagens, que concentra suas atividades em análises geoquímicas de solos, rochas e minérios, concentrados e ensaios metalúrgicos, bem como análises ambientais de águas, efluentes e resíduos industriais. O método de análise realizado conforme descrito pelo laboratório se inicia com as amostras sendo pulverizadas em moinho de aço a 95% e peneiras na fração < 150 mesh.

Com esta primeira parte executada, é realizado os métodos ICM14B e CVA02B Determinação de Metais e Mercúrio por Água Régia – ICP e Vapor a Frio, que consiste a decomposição das amostras através de abertura por água régia (HCl e HNO₃) na determinação de diversos elementos, onde a leitura é realizada por ICPMS / ICPOES. E a decomposição das amostras através de abertura por água régia (HCl e HNO₃) e soluções oxidantes (K₂CR₂O₇ e H₃NO.HCl), onde a leitura é realizada por Absorção Atômica com Vapor Frio. Ainda para as determinações litogeoquímicas foi realizado a análise de rocha total através de pastilha fundida e quantificação por Fluorescência de Raios X, que é a decomposição das amostras através de fusão em máquina automática com tetraborato de lítio e leitura da pastilha fundida por espectrofotômetro de RX, onde os resultados são em base natural.

Além da análise química das partículas de rochas, as rochas ou o pó devem passar por uma análise petrográfica. A análise petrográfica é uma técnica tradicional, e é realizada a partir de uma fina seção, chamada lâmina delgada, em um microscópio óptico. Para que isso seja

possível a amostra de rocha é cortada em serra diamantada, colada em uma lâmina de vidro com dimensões entre 2,5 X 4,0 centímetros e polida, até alcançar a espessura padrão de 0,03 milímetros (30 µm).

Através da análise petrográfica se determina a composição mineralógica modal da rocha, determinando quais minerais estão presentes e seus percentuais, além da presença de materiais amorfos, como o vidro vulcânico, o grau de alteração dos minerais que compõem a rocha, sua textura, estrutura, entre outros. Essas informações são importantes, pois quanto maior o grau de alteração, maior a liberação de nutrientes, que ocorre a partir da formação de minerais secundários, como os argilominerais em especial aqueles com estrutura 2:1. A textura da rocha indicou, entre outros itens, o tamanho dos minerais, e quanto mais fina for a rocha, mais facilmente ela irá liberar nutrientes (CETEM, 2004).

O tamanho dos grãos constituintes da rocha também implicará na granulometria adequada do pó de rocha. Ao determinar os minerais presentes, a análise petrográfica poderá estimar se esses minerais são potencialmente fornecedores de elementos, pois alguns minerais, embora ricos em macronutrientes, têm estruturas cristalinas muito resistentes e fechadas, o que dificulta a liberação de elementos, como por exemplo, o feldspato alcalino. As análises de caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida do microgabro e do latito foram realizadas pelo Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR, da Universidade Federal do Paraná, setor de ciências da Terra, departamento de geologia no ano de 2022.

Para o Microgabro, a análise petrográfica identificou textura fanerítica equigranular fina a muito fina, intergranular e intersertal, e estrutura maciça. É composto por matriz e vidro vulcânico devitrificado. A matriz é formada por cristais de plagioclásio, clinopiroxênio e minerais opacos. O vidro vulcânico ocorre devitrificado, alterado para argilominerais.

Para o Latito, a análise petrográfica identificou textura fanerítica equigranular muito fina a vitrofírica, hipocristalina com estrutura maciça. É composto por matriz cristalina e vidro vulcânico devitrificado. A matriz é formada por cristais de plagioclásio, feldspato alcalino, clinopiroxênio, quartzo e minerais opacos. O vidro vulcânico ocorre devitrificado, alterado para sílica microcristalina. Como minerais secundários ocorrem óxidos/hidróxidos de ferro como alteração de clinopiroxênio e minerais opacos e argilominerais como alteração de plagioclásio e feldspato alcalino, ambas incipientes e localizadas.

A granulometria mais adequada para o uso do pó de rocha como remineralizador está em torno de 0,3 mm. Neste diâmetro as partículas oferecem uma grande superfície de contato com os agentes que irão promover a alteração dos minerais e a liberação dos nutrientes, como

a água, os ácidos húmicos e fúlvicos e os microrganismos do solo, fundamentais para que ocorra a quebra dos minerais e liberação de nutrientes.

Para alcançar essa granulometria o pó de rocha deve passar na peneira ABNT nº 50 (com diâmetro de orifícios de 0,30 mm). A análise de granulometria também foi realizada pelo LAMIR no ano de 2022. O laboratório realizou análise granulométrica geológica por peneiramento a úmido, utilizando peneiras BERTEL entre as malhas *mesh* 5 e 325. O resultado desta análise determinou que o blend dos pós de rochas está 88,02% abaixo de 0,250 mm.

O pH de abrasão segundo a IN nº 5, 2016 do MAPA quantifica de forma indireta o grau de alteração da rocha que deu origem ao pó. A evolução do pH de abrasão permite verificar os processos de intemperismo, determinando se a rocha que deu origem ao pó está ou não alterada, pois o grau de alteração tem reflexos na liberação dos nutrientes. Um pH de abrasão elevado (próximo a 10) indica que a rocha não está alterada ou está pouco alterada. Em rochas alteradas o pH de abrasão resulta em valores próximos a 7,0. A análise do pH de abrasão do blend 70:30 foi realizado pelo Laboratório de Análises Químicas do Solo – LASA, da Universidade Federal de Viçosa no ano de 2022, e como resultado identificou o pH de abrasão em 8,92.

4.5 AMOSTRAGEM DE SOLO

Em cada área de pesquisa foram coletadas, em outubro de 2023, amostras de solo em dois pontos distintos: um onde foi aplicado o blend remineralizador e outro sem aplicação do blend, ambos sob o mesmo tipo de solo e manejos aproximados. Ao todo, foram realizadas coletas em 6 pontos de amostragem.

Em cada ponto de amostragem, foi delimitada uma área de aproximadamente 1 hectare para cada ponto de coleta. Nessas áreas, foram abertas quatro trincheiras com dimensões aproximadas de 40 × 40 × 40 cm por ponto amostrado, nas quais foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas nas profundidades de 0–5 cm, 5–10 cm e 10–30 cm, totalizando 72 amostras de solo.

Para a coleta das amostras de solo deformadas, foram utilizados uma pá reta e um trado holandês, este último especificamente para a análise da fertilidade do solo. Essas amostras de solo coletadas foram acondicionadas e armazenadas em sacos plásticos identificados com o local e tipo da amostra e foram destinadas ao laboratório de classificação de solos da Universidade Federal de Santa Catarina. As amostras foram destinadas às análises químicas de fertilidade (macro e micronutrientes), textura, teores de carbono orgânico total, matéria orgânica leve extraída em água, bem como para a determinação dos estoques totais de carbono.

As amostras de solo com estrutura indeformada, destinadas à determinação da densidade do solo, foram coletadas utilizando-se o método do anel volumétrico Kopeck, também conhecido como cilindro volumétrico. Esse método empregou cilindros metálicos de aço inoxidável com bordas cortantes, que foram introduzidos no solo e removidos cuidadosamente, a fim de preservar a integridade das amostras e evitar qualquer deformação ou perturbação física. Também se coletaram torrões (amostras indeformadas) para avaliação da estabilidade de agregados.

4.5.1 Coleta de Amostras para a Determinação da Densidade do Solo

Para as 72 amostras indeformadas coletadas para a determinação da densidade do solo (24 por área de estudo), foi utilizado o método do cilindro volumétrico de volume (50 cm³) conhecido (EMBRAPA, 2017). Nas áreas de pesquisa, o cilindro foi inserido verticalmente no perfil do solo nas camadas de 0–5 cm, 5–10 cm e 10–30 cm, até a sua borda nivelada com a superfície do solo nas camadas. Para a inserção do cilindro, foi utilizado como auxílio um martelo de borracha e um batedor. Após a introdução, o solo excedente foi cuidadosamente removido das extremidades, e as extremidades fechadas com tampas plásticas e envolto com plástico filme PVC, preservando a estrutura natural e umidade do solo contido. Após as coletas nas três áreas de estudos, os cilindros foram encaminhados para o Laboratório de Classificação de Solo, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis, para a determinação da densidade.

Para a determinação da densidade, foi utilizado a metodologia da Embrapa (2017), onde os cilindros com o solo são pesados, em seguida são postos em estufa a 110 °C por 72 horas e após este período os cilindros com o solo seco são pesados separadamente. Os dados da densidade do solo foram obtidos dividindo a massa seca do solo (g) pelo volume interno do anel (cm³), conforme a metodologia de Embrapa (2017), utilizando a fórmula:

$$D \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{massa seca do solo (g)}}{\text{volume do anel (cm}^3\text{)}}$$

4.5.2 Estabilidade dos Agregados

A estabilidade de agregados do solo das 72 amostras, foi determinada por meio do método do peneiramento úmido de Yoder, conforme protocolo descrito por Yoder (1936)

Kemper e Rosenau (1986) e adaptado pela Embrapa (1997). Dos agregados retidos na peneira de 4,00 mm, foram pesados 25 gramas e transferidos para uma peneira de 2,00 mm, que compõe um conjunto de peneiras com diâmetro de malha decrescente, a saber: 2,00; 1,00; 0,50; 0,25, 0,105 e 0,053 mm, conforme Embrapa (1997) e adaptado por Loss et al (2015). Os agregados inicialmente colocados na peneira de 2,00 mm foram umedecidos com borrifador de água, e posteriormente o conjunto de peneiras é submetido à tamisação vertical via úmida por 15 minutos no aparelho de Yoder (YODER, 1936). Transcorrido esse tempo, o material retido em cada peneira é retirado, separado com jato d'água, colocado em cadinhos de alumínio previamente pesados e identificados, e levado à estufa até a obtenção de massa seca constante. A partir da massa de agregados foi calculado o diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados, segundo Embrapa (1997).

4.5.3 Teores de carbono e nitrogênio totais do solo

A determinação do carbono orgânico total (COT) e o teor de nitrogênio total (NT) das 72 amostras de solo foi realizado no Laboratório de Solos, Água e Tecidos Vegetais da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis. Para a determinação foi utilizado analisador elementar CHN Serie II 2400 da Perkin Elmer, que possibilita a determinação do teor de Carbono e Nitrogênio em amostras orgânicas e inorgânicas. O método analítico do CHN 2400 baseia-se na combustão completa da amostra em altas temperaturas (cerca de 950 a 1000 °C), convertendo os elementos C e N em gases simples. Esses gases são então quantificados por detecção térmica (detector de condutividade térmica – TCD), permitindo o cálculo exato das concentrações dos elementos na amostra.

4.5.4 Matéria orgânica leve em água (MOL)

Para determinar a MOL, foram pesados 50 g de solo e acondicionados em beckeres de 250 mL, adicionando 100 mL de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, deixando em repouso por uma noite. Decorrido o tempo, a suspensão foi agitada com bastão de vidro e todo o material passado por peneira de 0,25 mm, eliminando-se toda a fração argila e silte (ANDERSON & INGRAM, 1994). O material retido na peneira (MOL e areia) foi transferido, quantitativamente, novamente para o becker, completando o volume com água. Todo o material flotado foi passado por peneira de 0,25 mm, tomando cuidado para separar a MOL da fração areia. Em seguida, foi adicionado novamente água ao becker, agitando manualmente para ressuspender a MOL restante e verter o material vagarosamente em peneira de 0,25 mm. Essa operação foi repetida até que todo o

material que flutuou com a agitação em água seja removida. O material que ficou retido na peneira (MOL) foi transferido para recipientes de alumínio (previamente pesados), levado a estufa a 60°C até atingir peso constante (72 horas), sendo pesado todo o conjunto.

4.5.5 Atributos Químicos Avaliados

As amostras de solos coletadas nas áreas da pesquisa foram encaminhadas para o Laboratório. Foram avaliados os atributos químicos avaliados foram: Cálcio, Magnésio, Potássio, Alumínio, Soma de Bases Trocáveis – S, Capacidade de Troca de Cátions – T, Saturação de Bases - V%, pH em Água, Acidez Potencial (H+Al) , CTC pH 7, CTC Efetiva, Fósforo, Cobre, Zinco, Ferro e Manganês. As metodologias descritas pelo laboratório para a quantificação dos atributos químicos avaliados foram: MO - Método Colorimétrico; SMP – pH; P e K - MEHLICH 1; Cu, Zn, Fe e Mn - MEHLICH 1; pH – Água; Ca, Mg e Al - KCL 1N; P Remanescente - CaCl_2 0,01 (Tedesco et al., 1995; Teixeira et al., 2017).

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

4.6.1 Análises estatísticas univariadas e multivariadas

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett), seguidos de análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ($p < 0,05$), com o pacote AgroR (SHIMIZU et al., 2023). Também foi realizado uma Análise de componentes principais (PCA) com os pacotes "stats" e "factoextra" (Kassambara e Mundt, 2020). As análises foram realizadas no software R v. 4.3.1 (R CORE TEAM, 2022).

4.6.2 Factor analysis for mixed data (FAMD)

A análise multivariada dos dados foi realizada por meio da Factor Analysis for Mixed Data (FAMD), técnica exploratória adequada para conjuntos de dados que integram simultaneamente variáveis quantitativas e qualitativas. Esse método permite a análise conjunta desses dois tipos de variáveis, atribuindo pesos equivalentes na construção dos eixos fatoriais, a partir da combinação dos princípios da Análise de Componentes Principais (PCA) e da Análise de Correspondência Múltipla (MCA).

As variáveis quantitativas foram previamente padronizadas (média zero e variância unitária), enquanto as variáveis qualitativas foram transformadas em variáveis indicadoras

(dummies), conforme procedimento padrão da técnica. A análise foi conduzida utilizando o pacote *FactoMineR* no ambiente estatístico R.

A FAMD permitiu a redução da dimensionalidade dos dados e a identificação de gradientes estruturais no sistema solo, por meio da construção de dimensões fatoriais ortogonais. A interpretação dos resultados foi baseada na variância explicada por cada dimensão, nas contribuições relativas das variáveis (contribuição percentual), na qualidade de representação ($\cos^2$) e nos coeficientes de correlação entre variáveis quantitativas e os eixos fatoriais.

Para a visualização dos padrões multivariados, foram utilizados biplots das duas primeiras dimensões, nos quais foram projetados simultaneamente indivíduos (amostras) e variáveis. Adicionalmente, foram construídas elipses de confiança para as categorias da variável qualitativa “tratamento” (com e sem aplicação de remineralizador), permitindo avaliar a separação entre grupos e a variabilidade interna.

A análise foi realizada separadamente para cada área experimental e de forma conjunta, com o objetivo de identificar padrões específicos e estruturais na variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS

5.1.1 pH em Água

No Assentamento Mimo (Figura 9a), o pH em água variou entre camadas e tratamentos. Na camada de 0–5 cm e 5-10 cm, o tratamento sem remineralizador apresentou pH significativamente maior em relação ao com remineralizador. Já em 10–30 cm, não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p \leq 0,05$). Esse comportamento sugere que a aplicação do remineralizador influencia principalmente as camadas superficiais, mas de forma diferenciada entre camadas, refletindo a dinâmica de dissolução de minerais silicatados, que ocorre de forma gradual e heterogênea no perfil do solo (Manning, 2010).

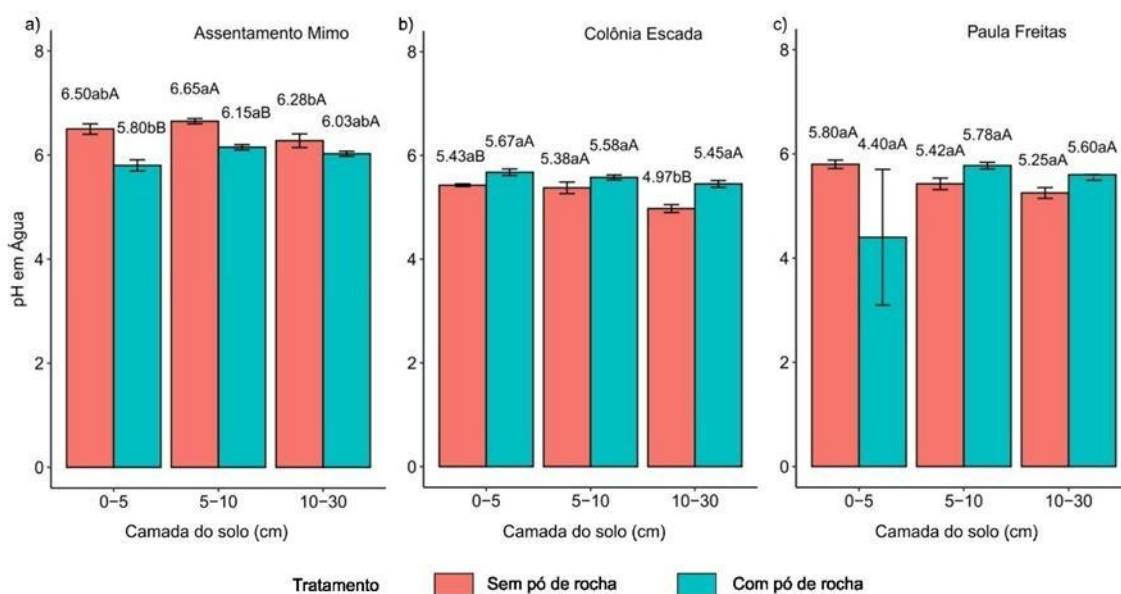
A dissolução libera cátions como Ca^{2+} e Mg^{2+} , capazes de atuar na neutralização da acidez, embora a eficiência dependa da composição mineralógica e das condições de intemperismo (Van Straaten, 2002). Resultados semelhantes foram relatados por Viana et al. (2021), que destacam que a remineralização pode alterar o pH de modo variável em função do ambiente. Dessa forma, no Assentamento Mimo, a aplicação contínua do blend

de microgabro e latito por mais de uma década promoveu incremento significativo do pH em todas as camadas, indicando efeito corretivo da acidez associado à liberação de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}).

Na Colônia Escada (Figura 9b), na camada superficial (0–5 cm), o pH em água apresentou valores próximos entre os tratamentos, com leve aumento no solo com pó de rocha em relação ao sem aplicação. Essa diferença, embora pequena, sugere início de efeito do remineralizador na superfície, possivelmente relacionado à liberação inicial de cátions básicos decorrente da dissolução de minerais mais reativos (Van Straaten, 2002).

Na camada intermediária (5–10 cm), os valores foram semelhantes, indicando que nessa profundidade o remineralizador não promoveu alterações estatisticamente significativas. Esse resultado reforça a ideia de que a dinâmica de dissolução de minerais e a consequente neutralização da acidez ocorrem de maneira gradual, dependendo tanto do tempo de exposição quanto da composição mineralógica do material aplicado (Manning, 2010; Viana et al., 2021).

Figura 9. Resultados do pH em água nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (Tukey; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Já na camada subsuperficial (10–30 cm), observou-se diferença mais evidente entre os tratamentos, com o solo tratado com pó de rocha apresentando pH superior (5,45) em relação ao sem pó (4,97). Esse aumento em subsuperfície é coerente com estudos que relatam que o remineralizador libera gradualmente cátions básicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e

K^+ , que deslocam H^+ e Al^{3+} da CTC, reduzindo a acidez e elevando a saturação por bases (Ribeiro et al., 2025; Conceição et al., 2022; Silva et al., 2022). Resultados semelhantes foram encontrados por Santana (2025), que destacou o potencial da remineralização em aumentar o pH e a fertilidade em solos tropicais, e por Fyfe et al. (2006), que demonstraram a eficácia da remineralização para melhorar a fertilidade química em subsuperfície.

Já em Paula Freitas (Figura 9c), os valores de pH apresentaram maior variabilidade, especialmente na camada superficial (0–5 cm), em que o tratamento com o remineralizador apresentou média inferior (4,40) ao sem pó (5,80), com elevado erro padrão. Nas camadas de 5–10 cm e 10–30 cm não houve diferenças significativas entre tratamentos. Esses resultados estão de acordo com pesquisas que demonstram que os efeitos do remineralizador sobre a neutralização da acidez se manifestam gradualmente, em função da dissolução progressiva dos minerais aplicados e da interação com a solução do solo (MANNING, 2010; VIANA et al., 2021).

A ausência de resposta nessas camadas reforça que fatores edáficos locais, como altos teores de óxidos de Fe e Al e a capacidade de tamponamento da acidez, podem limitar a eficiência da remineralização em determinados ambientes. Resultados semelhantes foram relatados por Martins et al. (2024), ao analisar a produção e uso de remineralizadores no Brasil, destacando a influência das características químicas do solo na resposta às aplicações.

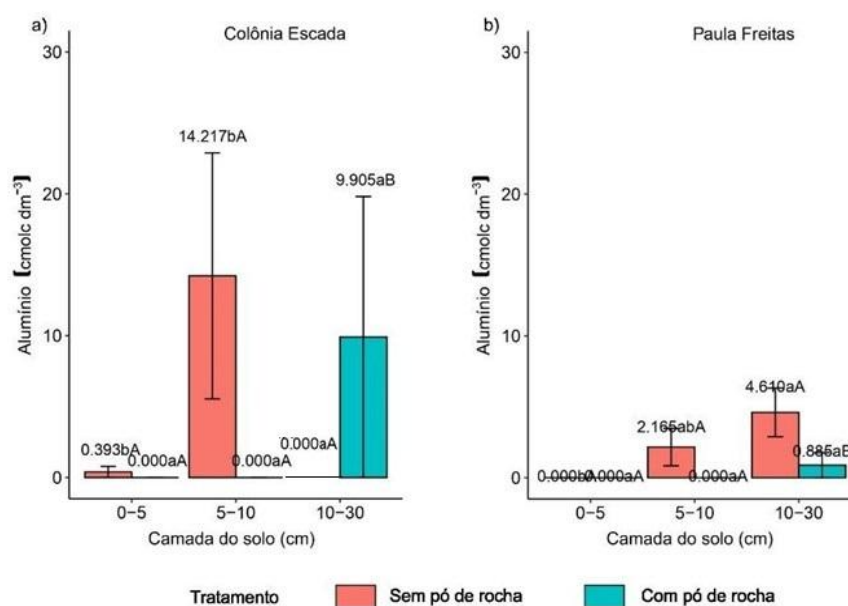
Na Colônia Escada, onde o remineralizador foi aplicado mais recentemente (2020 e 2022), e em Paula Freitas, com uso anual desde 2010 associado ao gesso agrícola, não se verificaram diferenças expressivas entre os tratamentos, possivelmente devido ao histórico de calagem e da própria ação conjunta de corretivos, que já condicionavam a acidez do solo. Esses resultados reforçam que a eficiência do remineralizador sobre o pH depende não apenas do contexto de manejo e do estado inicial de fertilidade química, mas também do tempo de uso contínuo do insumo.

5.1.2 Alumínio

Na avaliação do alumínio trocável (Al^{3+}), os resultados mostraram contrastes entre as áreas estudadas. Na Colônia Escada (Figura 10a), o remineralizador promoveu reduções expressivas do alumínio trocável. Na camada superficial (0–5 cm), o teor caiu de 0,393 $cmolc\ dm^{-3}$ no controle para 0,000 $cmolc\ dm^{-3}$ no tratamento com pó de rocha. O mesmo padrão ocorreu na camada de 5–10 cm, onde o valor foi de 14,217 $cmolc\ dm^{-3}$ no solo sem pó, contra 0,000 $cmolc\ dm^{-3}$ no solo tratado. Já em 10–30 cm, a aplicação do

remineralizador também reduziu significativamente o Al^{3+} , passando de 9,905 para 0,000 cmolc dm^{-3} . Esses resultados confirmam o potencial do remineralizador em neutralizar o alumínio tóxico no solo, processo que ocorre devido à liberação de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}), os quais competem por sítios de troca e deslocam o Al^{3+} da CTC (ELISA et al., 2016; RAHMAN et al., 2018; BASAK, 2021; LUCHESE et al., 2023). Assim, na Colônia Escada, onde a aplicação ocorreu em dois momentos recentes (2020 e 2022), o remineralizador mostrou forte impacto em subsuperfície, resultado que pode estar relacionado ao efeito mais imediato da liberação de cátions básicos em um solo ainda com elevada acidez.

Figura 10. Resultados do alumínio nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador na Colônia Escada (a) e em Paula Freitas (b). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Tukey; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Em Paula Freitas (Figura 10b), o comportamento foi semelhante, ainda que menos expressivo em superfície. Na camada de 0–5 cm, ambos os tratamentos apresentaram ausência de alumínio trocável. Na profundidade de 5–10 cm, o valor foi reduzido de 2,165 cmolc dm^{-3} (sem pó) para 0,000 cmolc dm^{-3} (com pó). Já na camada de 10–30 cm, a aplicação do remineralizador diminuiu o Al^{3+} de 4,610 para 0,885 cmolc dm^{-3} . Isso mostra que, mesmo em ambientes com menor acidez superficial, o remineralizador atua principalmente em subsuperfície, reduzindo a saturação por alumínio e ampliando a base

de troca catiônica, o que cria condições mais favoráveis ao desenvolvimento radicular (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022; OLADELE; CURAQUEO; AWODUN, 2024).

Para Paula Freitas, com aplicação contínua de 1 t/há desde 2010 associada ao gesso agrícola anual, os efeitos observados sobre o Al^{3+} refletem a ação conjunta dos dois corretivos ao longo do tempo, tornando difícil isolar o impacto específico do remineralizador. Assim, a área do uso demonstra que a resposta do Al^{3+} não é uniforme, mas depende da duração da aplicação e da interação com o manejo local. No Assentamento Mimo, os valores foram nulos (0) em todas as camadas (0–5, 5–10 e 10–30 cm), tanto no tratamento com remineralizador quanto sem pó de rocha. Esse comportamento indica que o solo local não apresenta problemas de toxidez por alumínio, o que pode estar associado ao histórico de manejo, à mineralogia do solo e à presença de bases trocáveis em níveis que neutralizam a acidez potencial.

De modo geral, os resultados indicam que a aplicação do remineralizador é eficaz na redução do alumínio tóxico em solos tropicais, principalmente em camadas subsuperficiais, onde normalmente a calagem apresenta menor eficiência devido à baixa mobilidade do calcário. Assim, o uso de pós de rocha pode ser estratégico para mitigar a toxidez por Al^{3+} em profundidade, favorecendo a exploração radicular e o aproveitamento de água e nutrientes pelas culturas (KUŚMIERZ et al., 2023; MANZONI; COTRUFO, 2024; ZHANG et al., 2024).

5.1.3 Acidez Potencial (H+Al)

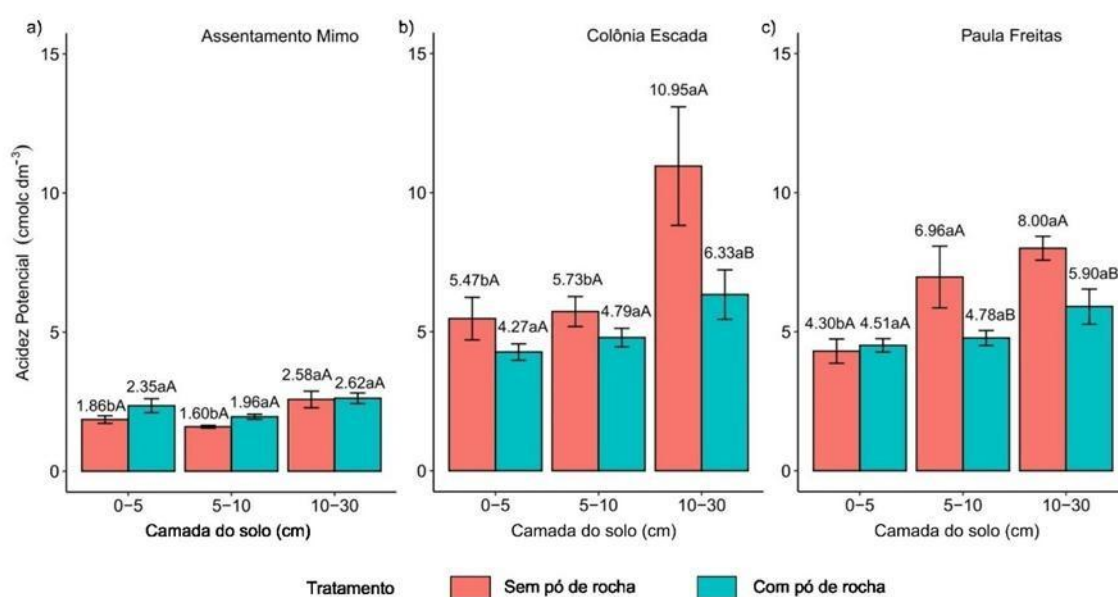
No Assentamento MIMO (Figura 11a), nas camadas 0–5 cm, 5–10 cm e 10–30 cm não houve diferenças significativas entre os tratamentos, mas houve diferenças entre camadas. Esse resultado sugere que, no Assentamento Mimo, a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos decorre do fato de que os valores de acidez potencial (H+Al) já são naturalmente baixos em todas as camadas analisadas.

Em solos com baixa acidez, a adição de remineralizadores tende a não promover alterações expressivas, visto que o aporte de cátions básicos ocorre em um ambiente com reduzida presença de H^+ e Al^{3+} a serem neutralizados (RAMOS et al., 2022; VIANA et al., 2021). Esse resultado reflete o histórico da área, caracterizado por manejo orgânico intensivo, adubação verde diversificada e ausência de fertilizantes químicos, que já favoreciam a neutralização natural da acidez. Além disso, o uso contínuo do remineralizador há mais de dez anos não se destacou como fator determinante, já que o

solo se encontrava tamponado pela alta adição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes.

Na Colônia Escada (Figura 11b), na camada 0–5 cm, o tratamento com remineralizador apresentou acidez potencial inferior ao tratamento sem aplicação, indicando que a liberação de cátions básicos em superfície contribuiu para a redução da acidez trocável. Estudos mostram que a dissolução de minerais de rochas básicas pode deslocar H^+ e Al^{3+} da CTC, reduzindo $H+Al$ no solo (VAN STRAATEN, 2002; RAMOS et al., 2022). Já na camada 5–10 cm, a diferença entre tratamentos foi pequena (5,73 sem e 4,79 com remineralizador), sem distinção estatística significativa, sugerindo que os efeitos ainda são incipientes nessa profundidade, resultado que está em consonância com trabalhos que destacam a natureza gradual da remineralização e sua dependência das condições edáficas locais (MANNING, 2010; VIANA et al., 2021). Para a camada 10–30 cm, observou-se a maior diferença entre tratamentos, com valores muito mais altos de acidez no solo sem remineralizador (10,95 $cmolc\ dm^{-3}$) em relação ao solo tratado (6,33 $cmolc\ dm^{-3}$). Essa redução em subsuperfície corrobora estudos que relatam que o remineralizador pode atuar como corretivo indireto, liberando Ca^{2+} e Mg^{2+} que neutralizam a acidez e reduzem os teores de $H+Al$ (CONCEIÇÃO et al., 2022; FYFE et al., 2006).

Figura 11. Resultados da acidez potencial $H+Al$ nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Para Colônia Escada, o remineralizador teve efeito mais evidente em subsuperfície, reduzindo a acidez em comparação à área sem aplicação. Como os manejos eram praticamente idênticos, essa diferença pode ser atribuída ao insumo, aplicado recentemente (2020 e 2022). A liberação de cátions básicos pelo blend de microgabro + latito (soma de bases = 9,91%) favoreceu a neutralização da acidez em profundidade, onde a calagem superficial mostrou menor eficiência.

Em Paula Freitas (Figura 11c), na camada 0–5 cm, os valores de $H+Al$ foram próximos entre os tratamentos, sem diferença significativa. Esse comportamento indica que, em superfície, o remineralizador não resultou em alteração imediata da acidez, o que está em consonância com o caráter de liberação lenta dos minerais (VAN STRAATEN, 2002). Na camada 5–10 cm, houve diferença mais evidente, com acidez superior no tratamento sem remineralizador ($6,96 \text{ cmolc dm}^{-3}$) em comparação ao tratado ($4,78 \text{ cmolc dm}^{-3}$). Essa redução sugere que o remineralizador atuou na diminuição da acidez potencial, efeito relatado em estudos que destacam a capacidade da remineralização de neutralizar $H+Al$ em profundidade por meio da liberação de cátions básicos (CONCEIÇÃO et al., 2022; RAMOS et al., 2022).

Na camada 10–30 cm, a tendência se manteve, com valores mais elevados no solo sem aplicação ($8,00 \text{ cmolc dm}^{-3}$) em relação ao com remineralizador ($5,90 \text{ cmolc dm}^{-3}$). Esse resultado reforça a hipótese de que, em determinados ambientes, o efeito do remineralizador é mais perceptível em subsuperfície, associado à lenta dissolução e maior mobilidade de cátions básicos, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+} (FYFE et al., 2006; VIANA et al., 2021). Dessa forma, em Paula Freitas, observou-se redução da acidez em subsuperfície no tratamento com remineralizador, mas esse efeito resulta da combinação entre insumos. Além do pó de rocha, a área recebe anualmente gesso agrícola desde 2018, que atua na neutralização da acidez em profundidade. O uso contínuo do remineralizador desde 2010, aliado ao gesso, favoreceu a melhoria das condições químicas do solo, embora o impacto isolado do blend seja mais difícil de identificar.

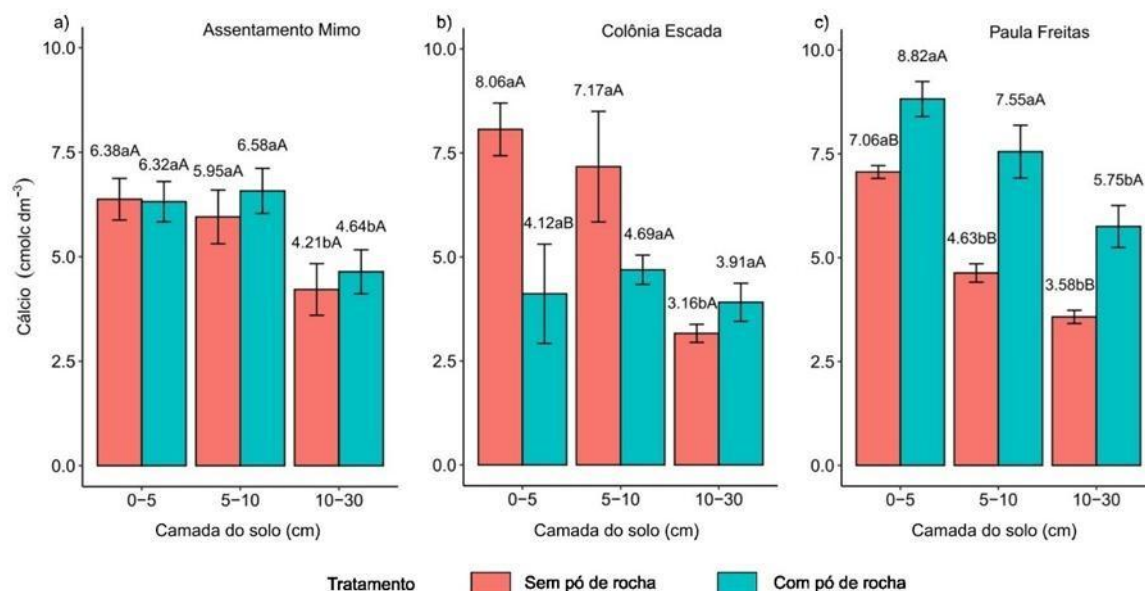
5.1.4. Cálcio

No Assentamento Mimo (Figura 12a), os valores de cálcio se mantiveram estáveis entre os tratamentos em todas as camadas avaliadas. Esse resultado indica que, em solos corrigidos com calagem, a aplicação do remineralizador tende a apresentar efeito discreto, como também relatado por Luchese et al. (2021) e Silva et al. (2022), que destacam que,

em ambientes com saturação por bases já elevada, o incremento de cálcio via remineralização ocorre de forma gradual e lenta.

Na Colônia Escada (Figura 12b), observou-se redução significativa dos teores de Ca^{2+} nas camadas de 0–5 cm e 5–10 cm com a aplicação do remineralizador em comparação ao tratamento sem aplicação. Já na camada de 10–30 cm, não houve diferença significativa entre os tratamentos (3,16 e 3,91 cmolc dm^{-3}). Esse comportamento reforça que a resposta do solo ao remineralizador é variável e pode não se manifestar imediatamente em todas as condições, conforme já observado por Martins et al. (2015) e Ribeiro et al. (2025). Dessa forma, para a Colônia Escada, o remineralizador não promoveu diferenças expressivas nos teores de cálcio em relação ao controle. Como os manejos das duas áreas eram praticamente idênticos e já havia aplicação regular de calcário, a contribuição do insumo, utilizado apenas em aplicações recentes (2020 e 2022), foi limitada. Isso sugere que a calagem foi o fator predominante para a manutenção dos níveis de cálcio no solo.

Figura 12. Resultados do cálcio nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



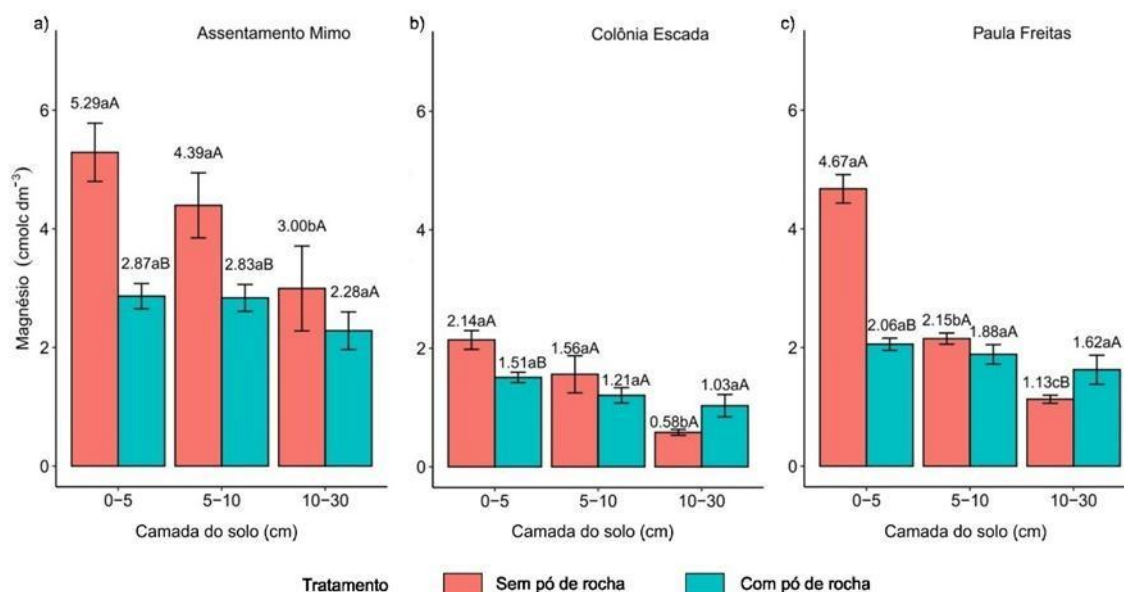
Em Paula Freitas (Figura 12c), houve um incremento expressivo nos teores de cálcio após a aplicação do remineralizador. Na camada de 0–5 cm, os valores aumentaram de 7,06 cmolc dm^{-3} (sem aplicação) para 8,82 cmolc dm^{-3} (com aplicação). O mesmo padrão foi observado na camada de 5–10 cm (4,63 para 7,55 cmolc dm^{-3}) e na camada de 10–30 cm (3,58 para 5,75 cmolc dm^{-3}).

Para Paula Freitas, o remineralizador mostrou maior impacto, elevando os teores de cálcio em todas as camadas quando comparado à área sem aplicação. O resultado reflete o efeito do uso contínuo do insumo desde 2010 aliado ao gesso agrícola aplicado anualmente desde 2018, criando um efeito sinérgico na melhoria da disponibilidade de cálcio, especialmente em profundidade. Esse resultado confirma o potencial dos remineralizadores como fontes de cálcio em solos tropicais, principalmente em condições que favorecem a dissolução dos minerais, como a interação com a matéria orgânica e a atividade biológica do solo (Theodoro & Leonardos, 2006; Ramos. et al, 2014). Além disso, a mobilidade observada em profundidade sugere que o cálcio liberado alcançou camadas subsuperficiais, comportamento também relatado por Santana (2025), que enfatizou os efeitos positivos da remineralização sobre a fertilidade de subsuperfície em sistemas agrícolas tropicais.

5.1.5. Magnésio

No Assentamento Mimo (Figura 13a), observou-se redução consistente nos valores de magnésio com o uso do remineralizador em todas as camadas. Esse comportamento pode estar associado ao fato de que, apesar do remineralizador conter magnésio em sua composição, a disponibilidade imediata depende da taxa de intemperismo do material, que em geral é baixa para minerais silicáticos ricos em Mg (Harley & Gilkes, 2000; Leonardos et al., 2000). Além disso, estudos apontam que a resposta em Mg^{2+} é bastante variável entre ambientes (LUCHESE et al., 2021; RIBEIRO et al., 2025), sendo influenciada pelo balanço entre liberação dos minerais e perdas por lixiviação (Resende et al., 2006; MARTINS, 2023).

Figura 13. Resultados do magnésio nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada (Figura 13b), na camada 0–5 cm, o tratamento sem remineralizador apresentou 2,14 cmolc dm⁻³, enquanto o com remineralizador ficou em 1,51 cmolc dm⁻³. Já nas camadas 5–10 cm e 10–30 cm, os teores foram semelhantes. Esse padrão sugere que a aplicação do remineralizador não elevou os níveis de magnésio, corroborando estudos que apontam que a liberação de Mg a partir de minerais como olivina, piroxênios e anfibólios é mais lenta do que a de Ca e K, exigindo maior tempo de interação com o solo (van Straaten, 2002; Manning, 2010). Além disso, a dinâmica do Mg²⁺ em solos tropicais, com maior mobilidade no perfil, pode reduzir o acúmulo superficial (Nogueira et al., 2021).

Em Paula Freitas (Figura 13c), os valores também indicaram diferenças significativas entre os tratamentos, especialmente nas camadas mais superficiais. Na camada de 0–5 cm, os teores reduziram de 4,67 cmolc dm⁻³ (sem remineralizador) para 2,06 cmolc dm⁻³ (com remineralizador). Na camada de 5–10 cm, os valores foram semelhantes, enquanto em 10–30 cm houve um leve incremento com o remineralizador.

Como o remineralizador é aplicado anualmente desde 2010, aliado ao uso contínuo de gesso agrícola desde 2018, também não resultou em aumento expressivo dos teores de magnésio. O gesso favorece a mobilidade de Ca²⁺ em profundidade, o que pode ter intensificado a competição com Mg²⁺ nos sítios de troca, reduzindo sua retenção. Além

disso, a adubação sintética adotada na área não inclui fontes de Mg, o que reforça a dependência da liberação lenta do remineralizador.

Esse conjunto de fatores ajuda a explicar os menores teores observados, principalmente em subsuperfície. Esse resultado mostra que, ao contrário do cálcio, o magnésio não apresentou aumento significativo com a aplicação do remineralizador, comportamento já descrito em ensaios de campo em solos tropicais, nos quais o Mg^{2+} apresenta maior susceptibilidade à lixiviação em comparação ao Ca^{2+} (Sousa & Lobato, 2004; Silva et al., 2022). Entretanto, a tendência de incremento em subsuperfície sugere que parte do magnésio liberado pode ter migrado para camadas mais profundas, fenômeno também reportado em estudos de rochagem com basaltos (Luchese et al., 2023).

5.1.6. Potássio

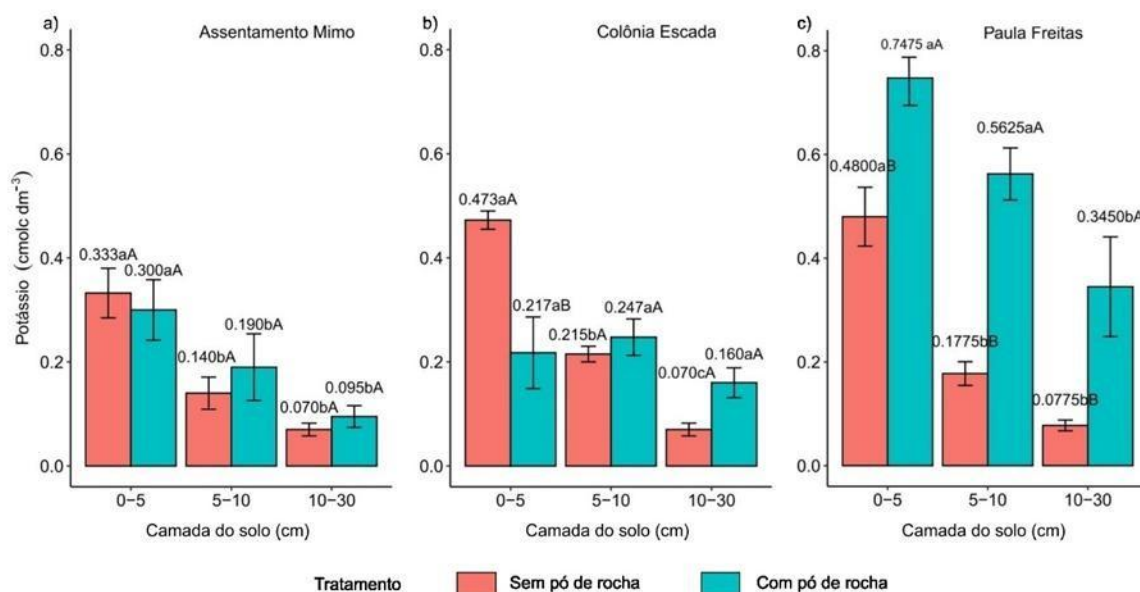
No Assentamento Mimo (Figura 14a), a maior disponibilidade de potássio foi observada na camada superficial (0–5 cm) em ambos os tratamentos, com tendência de redução em profundidade. Na camada de 5–10 cm, os teores permaneceram baixos, sem diferenças significativas, e na camada de 10–30 cm os valores foram ainda menores, com discreto aumento no tratamento com remineralizador. Esse comportamento, com maiores teores em superfície e queda progressiva ao longo do perfil, reflete a dinâmica típica do K^+ em solos tropicais intemperizados (Swoboda et al. 2022), nos quais a contribuição dos remineralizadores depende de maior tempo de intemperismo para disponibilização efetiva (van Straaten, 2002; Nogueira et al., 2021).

Na Colônia Escada (Figura 14b), o maior teor de potássio foi encontrado na camada superficial (0–5 cm) no tratamento sem remineralizador, enquanto no mesmo nível o tratamento com remineralizador apresentou valores mais baixos. Nas camadas intermediárias (5–10 cm), os teores de K foram semelhantes entre os dois tratamentos. Já em subsuperfície (10–30 cm), houve discreto incremento associado ao uso do remineralizador. Esse padrão evidencia que o efeito da aplicação não resultou em aumento imediato de K disponível, confirmando o que já foi descrito para minerais primários como feldspatos, cuja liberação de potássio é lenta e controlada por sua estrutura cristalina (Manning, 2010; Harley & Gilkes, 2000).

Para a Colônia Escada, não houve alterações significativas entre as parcelas, independentemente da aplicação do remineralizador em 2020 e 2022. O histórico de calagem e adubação mineral sem fontes adicionais de K manteve os níveis semelhantes. A

contribuição do blend foi limitada pelo curto tempo de uso e pela competição com outras fontes de nutrientes aplicadas no sistema intensivo de produção.

Figura 14. Resultados do potássio nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Em Paula Freitas (Figura 14c), o remineralizador promoveu incrementos consistentes em todas as camadas. Na camada superficial (0–5 cm), o tratamento com remineralizador apresentou valores mais elevados de K em comparação ao sem aplicação.

Na camada de 5–10 cm, também se verificou um aumento expressivo, evidenciando maior liberação do nutriente. Já na camada de 10–30 cm, o remineralizador manteve teores superiores em relação ao sem remineralizador. Esse padrão confirma o potencial do blend de microgabro e latito, cuja composição mineralógica inclui plagioclásios cálcico-sódicos, feldspatos potássicos, piroxênios e, em menor proporção, minerais ferromagnesianos. Esses minerais são fontes importantes de potássio, cálcio e magnésio, mas apresentam dissolução mais lenta que a observada em rochas alcalinas como fonolitos (Resende et al., 2006).

Para Paula Freitas, o remineralizador apresentou maior efeito, com aumento dos teores de potássio em todas as camadas. Esse resultado está associado ao uso contínuo do insumo desde 2010, em conjunto com o gesso agrícola anual aplicado desde 2018, que favorece a mobilidade de bases no perfil do solo. Além disso, a adubação mineral com cloreto de potássio, realizada de forma regular na área, também contribuiu para a elevação

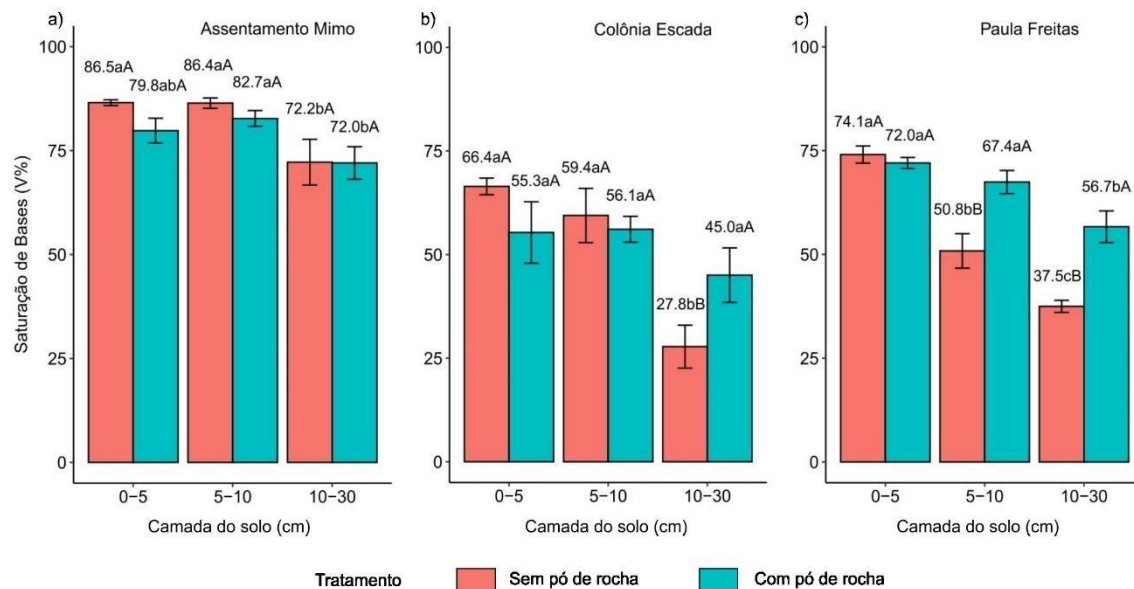
dos níveis de K, sendo difícil isolar o impacto específico do blend. Apesar das doses relativamente baixas de K_2O na sua composição (2,37%), o longo tempo de aplicação reforça sua participação no acúmulo gradual do nutriente, atuando de forma complementar às fontes solúveis de potássio.

Corroborando, estudos demonstram que basaltos, gabros e seus derivados podem liberar potássio de forma gradativa, especialmente quando submetidos ao intemperismo em solos tropicais (Harley & Gilkes, 2000; Manning, 2010; van Straaten, 2002). A interação com a microbiota do solo tende a intensificar esse processo (LUCHESE et al, 2021), uma vez que exsudatos radiculares e ácidos orgânicos microbianos promovem a dissolução parcial dos feldspatos e clinopiroxênios, aumentando a fração de K disponível no sistema (Shen et al., 2011; Priyono & Gilkes, 2008).

5.1.7. Saturação Por Bases

No Assentamento Mimo, os valores de saturação por bases não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos com e sem aplicação do remineralizador. Na camada de 0–5 cm, observa-se apenas pequena variação dentro do mesmo tratamento. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que, em solos já com elevada saturação por bases, o efeito adicional do remineralizador tende a ser menos evidente, uma vez que a fertilidade inicial já se encontra em níveis adequados para o desenvolvimento vegetal. No entanto, deve-se considerar que essa elevada saturação por bases pode ser, em parte, consequência do uso contínuo do remineralizador ao longo de mais de uma década, cuja liberação gradual de Ca, Mg e K contribui para manter a fertilidade em patamares elevados, como também discutido em revisões sobre remineralizadores em solos tropicais (Swoboda et al., 2022; Santana, 2025).

Figura 15. Resultados da saturação por bases nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com e sem pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com e sem pó de rocha dentro de cada profundidade.



Para a Colônia Escada (Figura 15b), os valores das camadas de 0–5 cm e 5–10 cm não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos nem entre as camadas. Já na camada de 10–30 cm, nota-se a maior distinção: o valor foi de 27,8% (sem pó) e 45,0% (com pó), apresentando diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos e entre as camadas dentro do mesmo tratamento.

Com esse resultado, observa-se melhora de V% em subsuperfície na área com remineralizador em relação ao controle. Como os manejos das parcelas foram praticamente idênticos, a diferença é coerente com as aplicações recentes do insumo (2020 e 2022), cuja liberação de Ca, Mg e K contribuiu para aumentar a saturação por bases. Como a calagem superficial apresenta efeito limitado em subsuperfície, a aplicação do blend de microgabro + latito mostrou-se mais efetiva em camadas mais profundas, onde a neutralização da acidez pelo calcário é menos eficiente.

A explicação está no fato de que o Microgabro e latito e outros remineralizadores liberam gradualmente cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), que substituem H^{+} e Al^{3+} da CTC, reduzindo a acidez e aumentando a V% (Ribeiro et al., 2025; Conceição et al., 2022; Silva et al., 2022). Esses resultados são consistentes com trabalhos clássicos de Theodoro & Leonardos (2000), que ressaltam o potencial da remineralização em melhorar a fertilidade química de solos tropicais em subsuperfície.

Na área de estudo no município de Paula Freitas (Figura 15c), os valores de saturação por bases revelaram diferenças mais expressivas entre os tratamentos e entre as camadas. Na camada de 0–5 cm, não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Já na camada de 5–10 cm, verificou-se diferença significativa entre os tratamentos e entre as camadas dentro do mesmo tratamento. Na camada de 10–30 cm, o padrão se manteve, também com diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos. Esses resultados evidenciam que, em Paula Freitas, a aplicação de pó de rocha promoveu incrementos significativos na saturação por bases em camadas mais profundas (5–10 e 10–30 cm), sugerindo um efeito positivo do insumo sobre a melhoria da fertilidade do solo em subsuperfície.

A área com uso anual do remineralizador desde 2010, associada ao gesso agrícola desde 2018 e à adubação com KCl, apresentou V% superior ao controle ao longo do perfil. A combinação de longo tempo de aplicação do pó de rocha (fornecendo bases), do gesso (favorecendo mobilidade de Ca em profundidade) e do KCl (fonte solúvel de K) cria efeito cumulativo, difícil de dissociar entre as fontes. Resultado: V% mais alta com ação conjunta de corretivos e fertilizantes.

Essa tendência é coerente com outros trabalhos que demonstraram ganhos de V% em camadas mais profundas após a aplicação de pó de basalto (Ribeiro et al., 2025; Conceição et al., 2022), além de estudos que registraram elevação do pH, teores de Ca e Mg, soma de bases e redução do Al^{3+} trocável em solos tratados com remineralizadores (Silva et al., 2022; Santana, 2025).

5.1.8. CTC

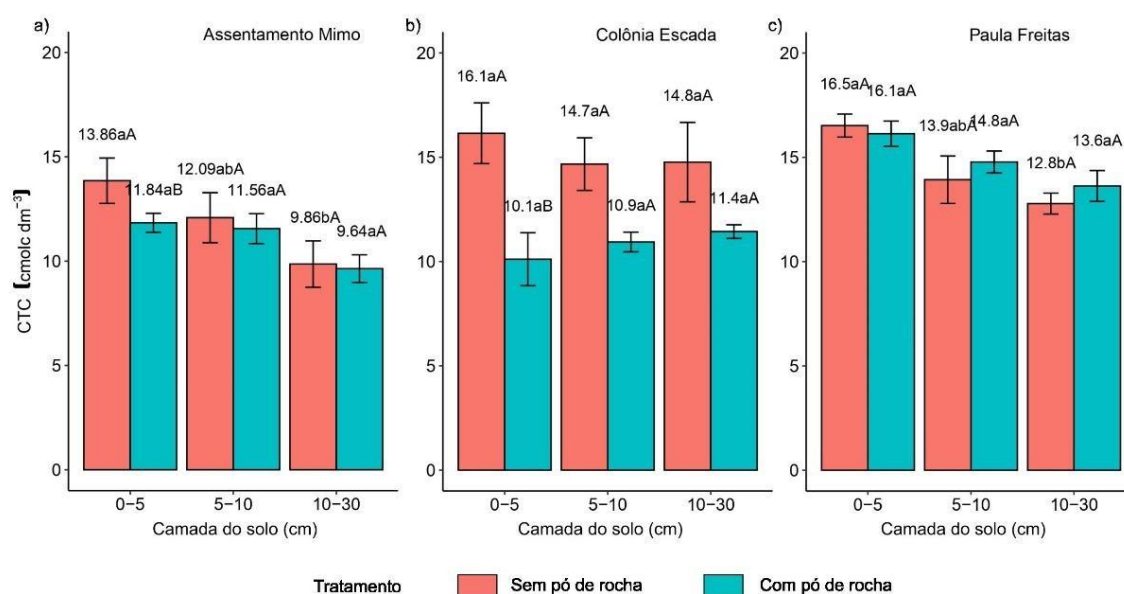
A aplicação do remineralizador influenciou de forma distinta a capacidade de troca catiônica (CTC) entre os locais estudados. No Assentamento Mimo (Figura 16a), observou-se maior CTC na camada superficial (0–5 cm) sem o remineralizador ($13,86 \text{ cmolc dm}^{-3}$) em relação ao tratamento com pó ($11,84 \text{ cmolc dm}^{-3}$). Na camada de 5–10 cm, os valores foram próximos ($12,09$ vs. $11,56 \text{ cmolc dm}^{-3}$), enquanto na profundidade de 10–30 cm houve diferença mais acentuada, com aumento de $9,86 \text{ cmolc dm}^{-3}$ no controle para $9,64 \text{ cmolc dm}^{-3}$ com remineralizador, mas sem variação significativa.

A CTC foi semelhante entre os tratamentos, sem efeito marcante do remineralizador. O manejo orgânico de longa duração, associado ao uso contínuo do insumo por mais de dez anos, já mantém o solo enriquecido em matéria orgânica e bases trocáveis, o que pode mascarar ganhos adicionais. Assim, a elevada CTC pode ser

resultado da interação entre o aporte de matéria orgânica e a liberação gradual de nutrientes pelo blend.

Esses resultados sugerem que a aplicação promoveu incremento inicial da CTC, especialmente na superfície, coerente com estudos que mostram a liberação gradual de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) a partir de minerais máficos e feldspatóides presentes em rochas silicatadas (BASAK, 2021; LUCHESE et al., 2023).

Figura 16. Resultados da capacidade de troca catiônica – CTC nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de ScottKnott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com e sem pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com e sem pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada, a CTC apresentou valores menores no tratamento com remineralizador em comparação à área sem aplicação, embora, ao mesmo tempo, tenham sido observados ganhos em saturação por bases (V%) e forte redução do alumínio trocável em subsuperfície. Esse resultado não significa perda de fertilidade, mas sim uma resposta ao efeito corretivo do remineralizador. Como a CTC a pH 7 é calculada pela soma das bases trocáveis (SB) mais a acidez potencial ($\text{H}^{+} + \text{Al}$), a redução da acidez promovida pelo insumo (aplicado em 2020 e 2022) leva a uma diminuição do valor absoluto da CTC.

Assim, a queda observada reflete principalmente a neutralização de H^{+} e Al^{3+} , ao passo que a disponibilidade de bases foi ampliada, evidenciada pelo aumento de V%. Portanto, a interpretação correta deve integrar os três indicadores — CTC, V% e alumínio trocável — para demonstrar que o remineralizador contribuiu positivamente para a

melhoria da fertilidade do solo, especialmente em profundidade, onde a calagem superficial apresenta menor alcance.

Esse padrão sugere que, nesse local, o remineralizador teve maior impacto positivo, melhorando a retenção de cargas no solo ao longo de todo o perfil. Resultados semelhantes foram relatados em solos tropicais brasileiros, em que a aplicação de pó de rocha aumentou a CTC e reduziu a acidez potencial em subsuperfície, favorecendo maior resiliência do sistema (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

Em Paula Freitas (Figura 16c), os teores de CTC se mantiveram elevados em todas as camadas, independentemente do uso do remineralizador, variando de 16,5 a 13,6 cmolc dm⁻³. Não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos, embora se note uma leve tendência de maior equilíbrio nos valores com a aplicação do pó de rocha. O uso contínuo do insumo desde 2010, aliado à aplicação anual de gesso agrícola e ao aporte de fertilizantes de alta solubilidade, assegura a reposição constante de bases ao sistema. Nesse cenário, a manutenção de valores elevados de CTC está mais relacionada à mineralogia do Latossolo e ao acúmulo histórico de corretivos (incluindo o remineralizador) do que ao efeito isolado do remineralizador.

Ainda assim, a literatura aponta que, mesmo em solos de alta CTC, a aplicação de rochas silicatadas pode contribuir com liberação contínua de cátions e manutenção da fertilidade no longo prazo (OLADELE; CURAQUEO; AWODUN, 2024). De forma geral, os resultados confirmam que a eficácia do remineralizador em aumentar a CTC depende das características locais do solo, sendo mais evidente em Colônia Escada e Assentamento Mimo, enquanto em Paula Freitas a resposta foi menos pronunciada. Isso reforça que o efeito dos remineralizadores está associado à interação entre mineralogia do remineralizador, textura franco-argilosa das parcelas e a condição química inicial dos solos.

5.1.9. Fósforo

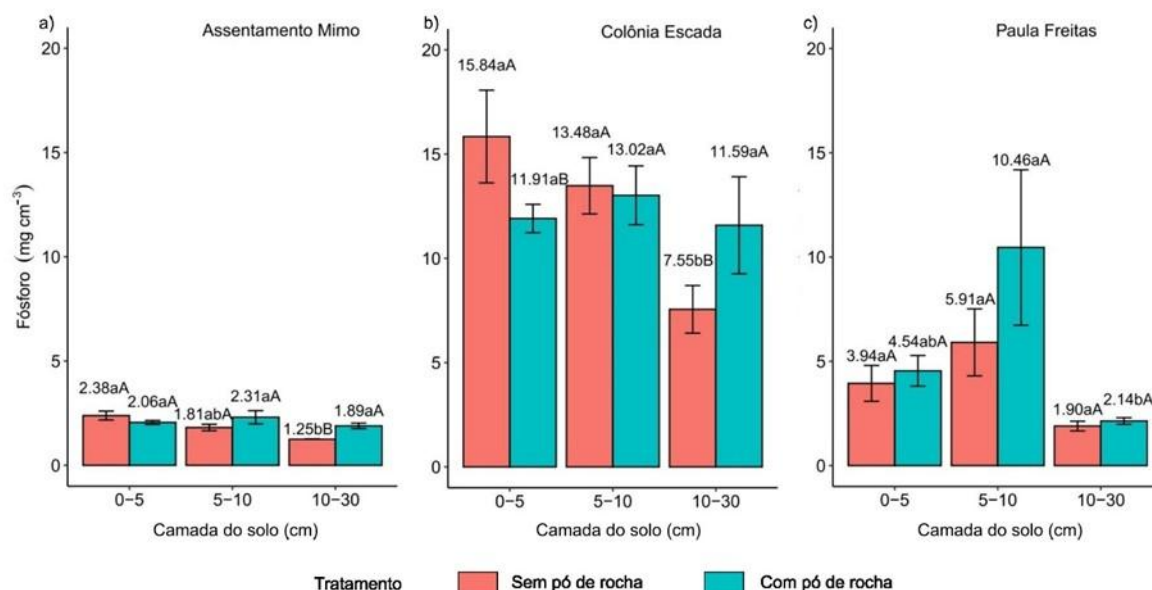
No Assentamento MIMO, os valores foram baixos em todo o perfil, sem diferenças expressivas entre os tratamentos (Figura 17a). Isso já era esperado, pois o remineralizador utilizado contém P₂O₅ em teores muito reduzidos, insuficientes para alterar a disponibilidade do nutriente em curto ou médio prazo. No sistema orgânico, a principal fonte de P tende a ser a mineralização da matéria orgânica e resíduos vegetais, o que explica os níveis estáveis entre os manejos.

Esse resultado reforça que o remineralizador não foi uma fonte imediata de fósforo disponível nesse ambiente, além da baixa disponibilidade do remineralizador, comportamento coerente com a baixa solubilidade do P presente em minerais primários, quando aplicados em solos tropicais ácidos e altamente intemperizados (Novais et al., 2007; Resende et al., 2006). A disponibilidade de fósforo, nesses casos, depende fortemente da associação com microrganismos solubilizadores e da fonte e mineralogia do material aplicado (Shen et al., 2011).

Para a Colônia Escada (Figura 17b), nas camadas de 0–5 cm e 5–10 cm, houve uma redução com o remineralizador em comparação com a área sem pó. Esse comportamento reforça que o blend de microgabro + latito não é uma fonte expressiva de P, já que seu teor de P_2O_5 está muito abaixo.

Já na camada de 10–30 cm, ocorreu comportamento inverso: $7,55 \text{ mg cm}^{-3}$ sem remineralizador contra $11,59 \text{ mg cm}^{-3}$ com remineralizador, indicando incremento em subsuperfície. Esse padrão sugere que o fósforo do remineralizador pode ter sido parcialmente liberado e redistribuído no perfil, processo favorecido pela interação com ácidos orgânicos e pela solubilização induzida pela microbiota do solo (Shen et al., 2011; Sousa & Lobato, 2017). Além disso, resultados semelhantes já foram relatados em experimentos com pó de basalto, nos quais não houve ganho imediato de P em superfície, mas aumentos foram observados em camadas subsuperficiais (Martins et al., 2022; LUCHESE et al., 2021).

Figura 17. Resultados do fósforo nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Em Paula Freitas (Figura 17c), o comportamento foi distinto, com ganhos em algumas camadas. Nas camadas de 0–5 cm e 10–30 cm, os valores foram próximos. Na camada de 5–10 cm, ocorreu aumento expressivo com remineralizador (5,91 e 10,46 mg cm⁻³). Esse padrão demonstra que a aplicação de remineralizador pode atuar como fonte complementar de fósforo, especialmente quando há concentração e condições favoráveis para a dissolução dos minerais (Manning, 2010). Incrementos como os observados em 5–10 cm foram relatados em experimentos de remineralização com fonolito e nefelina sienito, que possuem maior liberação de P e K em comparação a minerais menos reativos (Nogueira et al., 2021). O aumento em subsuperfície também sugere mobilidade de parte do P liberado, possivelmente mediado por complexação orgânica (Richardson & Simpson, 2011).

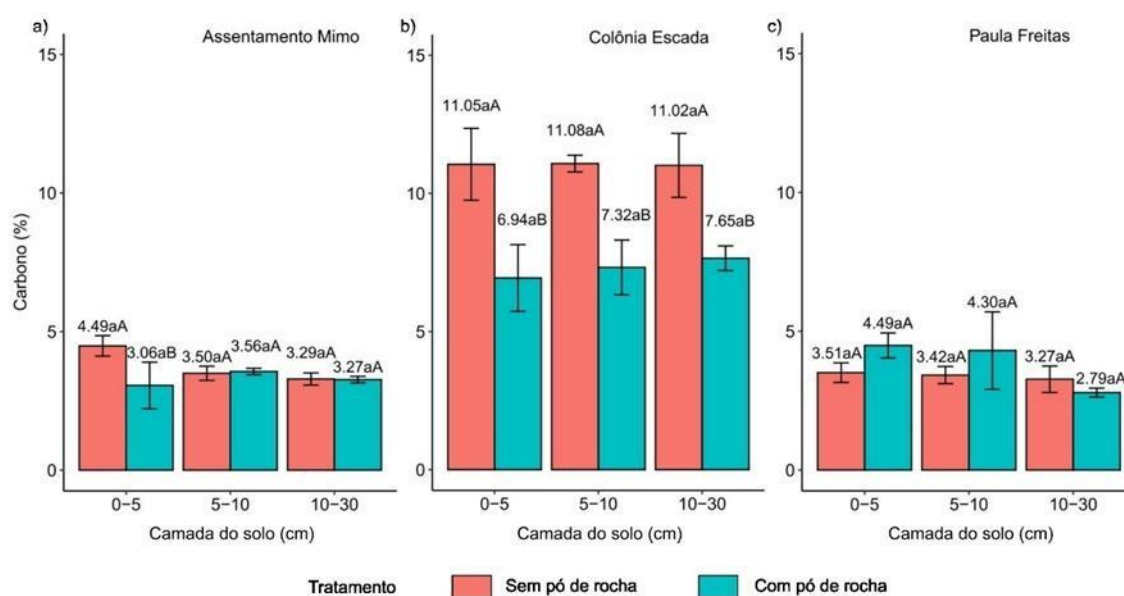
5.1.10. Carbono

No Assentamento MIMO (Figura 18a), observou-se diferença significativa apenas na camada superficial (0–5 cm), em que o solo sem remineralizador apresentou teor de 4,49%, contra 3,06% no solo com pó. Nas camadas de 5–10 e 10–30 cm os valores foram semelhantes entre tratamentos, variando de 3,29% a 3,56%, sem diferenças estatísticas.

Os estoques de C nesse ambiente estão fortemente associados ao tipo de solo, manejo mecânico e ao manejo orgânico de longa duração, com adubação verde e compostos da propriedade. Assim, a dinâmica do carbono em Mimo está mais relacionada ao aporte constante de resíduos vegetais e à ciclagem biológica do que à aplicação do remineralizador.

Esses resultados reforçam a visão de que os remineralizadores não aumentam diretamente o carbono orgânico do solo no curto prazo, mas podem estimular processos de longo prazo que favorecem a ciclagem de nutrientes e a estabilização da matéria orgânica (RAMOS et al., 2022). Ensaio de campo em regiões agrícolas também mostraram que a aplicação de rochas silicatadas pode melhorar a fertilidade do solo e reduzir sua acidificação, criando condições que, a médio prazo, sustentam maior acúmulo de carbono (BEERLING et al., 2023).

Figura 18. Resultados do carbono nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada (Figura 18b), os teores de carbono foram significativamente maiores no solo sem aplicação do remineralizador, atingindo valores próximos de 11% em todas as camadas (0-5, 5-10 e 10-30 cm), enquanto no solo tratado com pó os valores foram inferiores, variando de 6,94% a 7,65%. Esse resultado indica que, nesse ambiente, a aplicação do remineralizador não promoveu incremento imediato no estoque de carbono, corroborando estudos que destacam que os efeitos da remineração sobre a matéria orgânica

ocorrem de forma indireta e em longo prazo, principalmente pela liberação gradual de nutrientes e pela interação com a microbiota do solo (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022). De fato, pesquisas em campo demonstram que o intemperismo acelerado de silicatos pode contribuir para o sequestro de CO₂ e para ganhos agronômicos, mas seus efeitos são mais evidentes após alguns anos de aplicação (BEERLING et al., 2023).

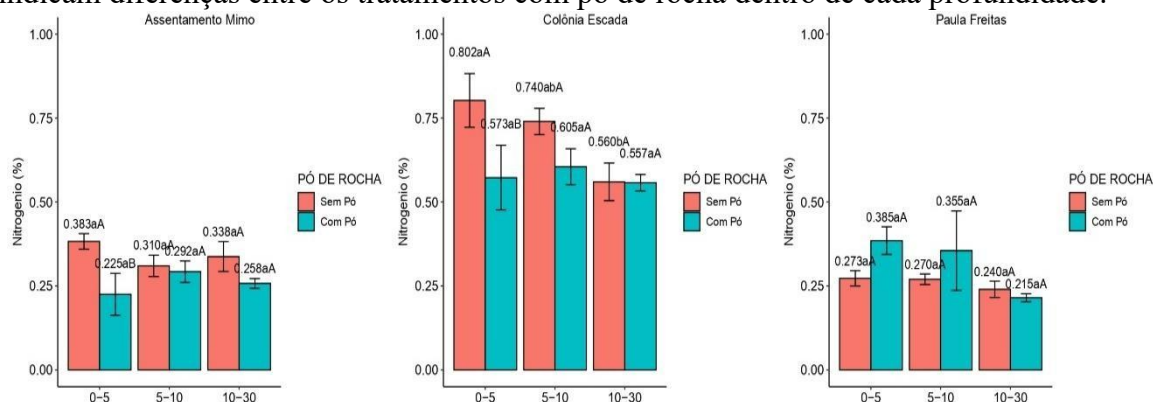
Já em Paula Freitas (Figura 18c), os teores de carbono variaram entre 2,79% e 4,49%, mas não houve diferenças significativas entre os tratamentos em nenhuma profundidade. Esse comportamento mostra que os efeitos do remineralizador dependem fortemente das condições locais, como textura, mineralogia e quantidade de resíduos vegetais disponíveis no solo (BENEVIDES FILHO et al., 2023). Em solos tropicais, essas interações são ainda mais complexas, e o potencial de remineralizadores para contribuir com a matéria orgânica depende tanto da reatividade do material quanto da integração com práticas de manejo que favoreçam o aporte de biomassa (CLARKSON et al., 2024).

De forma geral, os resultados demonstram que o impacto da aplicação de pós de rocha sobre o carbono do solo não é uniforme entre diferentes áreas. Enquanto em Colônia Escada e no Assentamento Mimo os teores de carbono foram maiores nos solos sem pó, em Paula Freitas não houve diferenças. Isso confirma que os remineralizadores devem ser entendidos como estratégias de médio e longo prazo, que atuam indiretamente no sequestro de carbono por meio da melhoria da fertilidade, da redução da acidez e do suporte à atividade microbiana (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022; BEERLING et al., 2024). Assim, sua eficácia está vinculada ao tempo de aplicação e às condições edafoclimáticas de cada ambiente.

5.1.11. Nitrogênio

A dinâmica do nitrogênio (N) mostrou respostas distintas ao remineralizador (microgabro + latito) entre os locais. No Assentamento Mimo (Figura 19a), o N foi maior no tratamento sem remineralizador na camada 0–5 cm (0,383% vs. 0,225%), enquanto nas camadas de 5–10 e 10–30 cm os tratamentos foram semelhantes. Esse padrão é coerente com o entendimento de que rochas silicatadas não fornecem N diretamente; o N disponível depende sobretudo da ciclagem da matéria orgânica e da interação microrganismos–mineral–planta, em que a sorção em superfícies minerais pode imobilizar/redisponibilizar N ao longo do tempo (DALY et al., 2021; MANZONI; COTRUFO, 2024; SOUZA et al., 2024).

Figura 19. Resultados do nitrogênio nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada (Figura 19b), o tratamento sem remineralizador manteve teores mais altos em todas as camadas (0–5, 5–10 e 10–30 cm). Essa ausência de resposta imediata é compatível com estudos que mostram que efeitos de pós de rocha ocorrem indiretamente, via ajustes de pH/CTC e liberação de cátions (Ca, Mg), com reflexos graduais sobre a retenção de amônio e a mineralização do N — processos modulados pelo pH e pela textura do solo (LUCHESE et al., 2023; KUŚMIERZ et al., 2023).

Em Paula Freitas (Figura 19c), houve leve aumento superficial com remineralizador (0,385% vs. 0,273% em 0–5 cm), enquanto as camadas inferiores permaneceram próximas entre tratamentos. Um mecanismo plausível é a estabilização de N na fração mineral-associada (MAOM) favorecida por ajustes químicos do solo promovidos pelo pó de rocha, o que reduz perdas rápidas por mineralização e lixiviação (DALY et al., 2021; MANZONI; COTRUFO, 2024; LUCHESE et al., 2023).

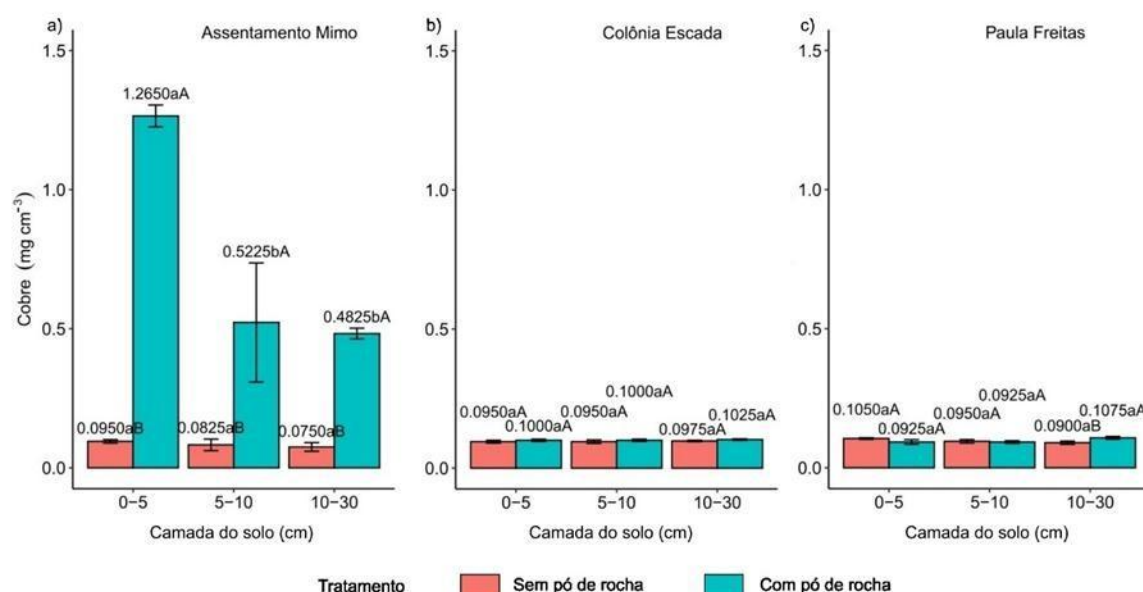
5.1.12. Cobre

A disponibilidade de cobre (Cu) apresentou comportamentos contrastantes entre os locais avaliados. No Assentamento MIMO, verificou-se um aumento expressivo do cobre em todas as camadas do solo com a aplicação do remineralizador (Figura 20a). Na camada de 0–5 cm, os teores se elevaram de aproximadamente 0,095 para 1,265 mg dm⁻³, representando mais de dez vezes de incremento. Situação semelhante foi observada em 5–10 cm, onde os valores passaram de 0,0825 para 0,5225 mg dm⁻³, e em 10–30 cm, com elevação de 0,075 para 0,4825 mg dm⁻³.

Houve um forte incremento nos teores de Cu na área com remineralizador em todas as camadas, especialmente em superfície. Esse resultado chama atenção, já que o blend tem baixo teor de cobre. A explicação mais plausível é que o manejo orgânico, com uso contínuo de compostos e adubação verde, associado ao remineralizador aplicado há mais de dez anos, tenha favorecido a ciclagem e a complexação do Cu na matéria orgânica, aumentando sua disponibilidade no solo. Aqui, o pó de rocha atua indiretamente, melhorando o ambiente químico (pH, Ca, Mg, K), o que reduz a fixação do Cu em formas indisponíveis.

A literatura confirma que a granulometria fina dos remineralizadores desempenha papel central no aumento da liberação de micronutrientes, inclusive cobre, já que partículas menores apresentam maior área de contato e reatividade (BASAK, 2020). Além disso, pesquisas recentes reforçam que o uso de remineralizadores ao longo do tempo pode fornecer quantidades ambientalmente seguras de Cu, Fe, Zn e Mn, tornando-se uma alternativa promissora de remineralização de solos tropicais (SWOBODA et al., 2022; CONCEIÇÃO et al., 2022; LUCHESE et al., 2023).

Figura 20. Resultados do cobre nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada, os valores permaneceram muito baixos em todas as camadas do solo, variando de 0,095 a 0,1025 mg dm⁻³, sem diferenças estatísticas entre o tratamento com e sem remineralizador (Figura 20b). Esse resultado indica que a aplicação do blend

de microgabro e latito não alterou significativamente a dinâmica do cobre nesse ambiente, o que pode estar relacionado à baixa concentração e à baixa solubilidade dos minerais portadores desse elemento. Estudos demonstram que a liberação de Cu a partir de rochas moídas é geralmente limitada e pode se tornar mais expressiva apenas quando há adição de matéria orgânica, a qual atua como agente quelante, favorecendo a solubilização do micronutriente (CHAUDHARY et al., 2011). Mas para que isto ocorra é necessário ter concentrações viáveis de Cu no material utilizado.

Em Paula Freitas, os teores de cobre também permaneceram estáveis e baixos, situando-se entre 0,0925 e 0,1075 mg dm⁻³, sem diferenças estatísticas entre os tratamentos (Figura 20c). Esse comportamento sugere que, assim como em Colônia Escada, o remineralizador aplicado não contribuiu significativamente para a disponibilidade de Cu, possivelmente em razão da mineralogia do solo local ou de concentração do elemento no blend, condições químicas, como o pH e a saturação por bases, que limitam a dissolução de minerais contendo cobre. Revisões recentes apontam que, em ambientes onde não se alteram os fatores edáficos que favorecem a mobilidade do Cu, a liberação a partir de pós de rocha tende a ser baixa (CHAUDHARY et al., 2011; SWOBODA et al., 2022).

De modo geral, a resposta do cobre ao remineralizador variou conforme as condições edáficas e a interação entre a mineralogia do pó de rocha e as características do solo. Enquanto em Colônia Escada e Paula Freitas os valores permaneceram estáveis e sem resposta significativa, em Mimo houve um aumento notável em todas as camadas. Essa variação está de acordo com as evidências recentes de que remineralizadores podem, em determinadas condições, se constituir em fonte importante de micronutrientes para culturas agrícolas, desde que aplicados em quantidades e granulometria adequadas e em solos com condições favoráveis à dissolução dos minerais (BASAK, 2021; CONCEIÇÃO et al., 2022; LUCHESE et al., 2023).

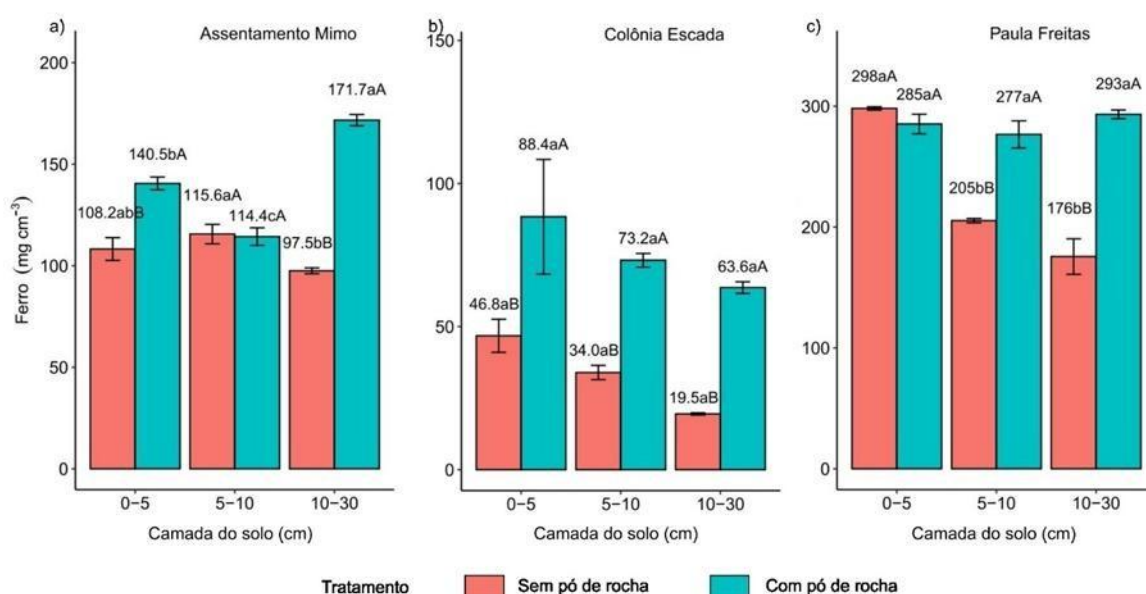
5.1.13. Ferro

No Assentamento Mimo, a aplicação do remineralizador resultou em incremento de ferro, embora com intensidade variável entre as camadas (Figura 21a). Na superfície (0–5 cm), houve aumento de 108,2 para 140,5 mg dm⁻³, enquanto na camada intermediária (5–10 cm) os valores foram semelhantes entre tratamentos (115,6 e 114,4 mg dm⁻³). Já em 10–30 cm, a diferença foi marcante, com 97,5 mg dm⁻³ sem o remineralizador e 171,7 mg dm⁻³ com o remineralizador. Esse padrão sugere que a dissolução de minerais ricos em

ferro pode ter contribuído para maior mobilidade vertical, ampliando a disponibilidade em subsuperfície (NOGUEIRA et al., 2021).

Estudos destacam que a biodisponibilidade do ferro está associada não apenas à dissolução química, mas também à atividade de microrganismos, que podem acelerar a liberação de micronutrientes de minerais primários (SHEN et al., 2011; ASSUNÇÃO et al., 2023). Além disso, o manejo orgânico contribui para a complexação do Fe com a matéria orgânica, aumentando a fração extraída e disponível no solo.

Figura 21. Resultados do ferro nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada, os teores de ferro apresentaram aumentos expressivos com a aplicação do remineralizador em todas as camadas (Figura 21b). Na camada superficial (0–5 cm), os valores subiram de 46,8 mg dm⁻³ sem o remineralizador para 88,4 mg dm⁻³ com o remineralizador. O mesmo comportamento foi observado em 5–10 cm (34,0 para 73,2 mg dm⁻³) e em 10–30 cm (19,5 para 63,6 mg dm⁻³).

O efeito é coerente com a presença de minerais máficos no blend, mas o impacto ainda é parcial devido ao tempo relativamente curto de aplicação. A diferença também reflete a capacidade do remineralizador em liberar Fe mesmo em ambientes de manejo intensivo, reforçando seu papel como fonte secundária de micronutrientes.

Esses resultados evidenciam o potencial do remineralizador em liberar ferro de forma gradativa para o perfil do solo, efeito associado à dissolução de minerais ferromagnesianos presentes no microgabro e no latito (MANNING, 2010). A literatura

indica que a aplicação de rochas silicáticas pode atuar como fonte de ferro biodisponível, especialmente em solos tropicais intemperizados (THEODORO; LEONARDOS, 2006; MARTINS et al., 2023).

Em Paula Freitas, os teores de ferro foram elevados em todo o perfil, mas a aplicação do remineralizador promoveu efeitos claros em subsuperfície (Figura 21c). Na camada de 0–5 cm, não houve diferença estatística, mas em 5–10 cm os valores aumentaram de 205 para 277 mg dm⁻³, e em 10–30 cm o incremento foi ainda mais expressivo, de 176 para 293 mg dm⁻³.

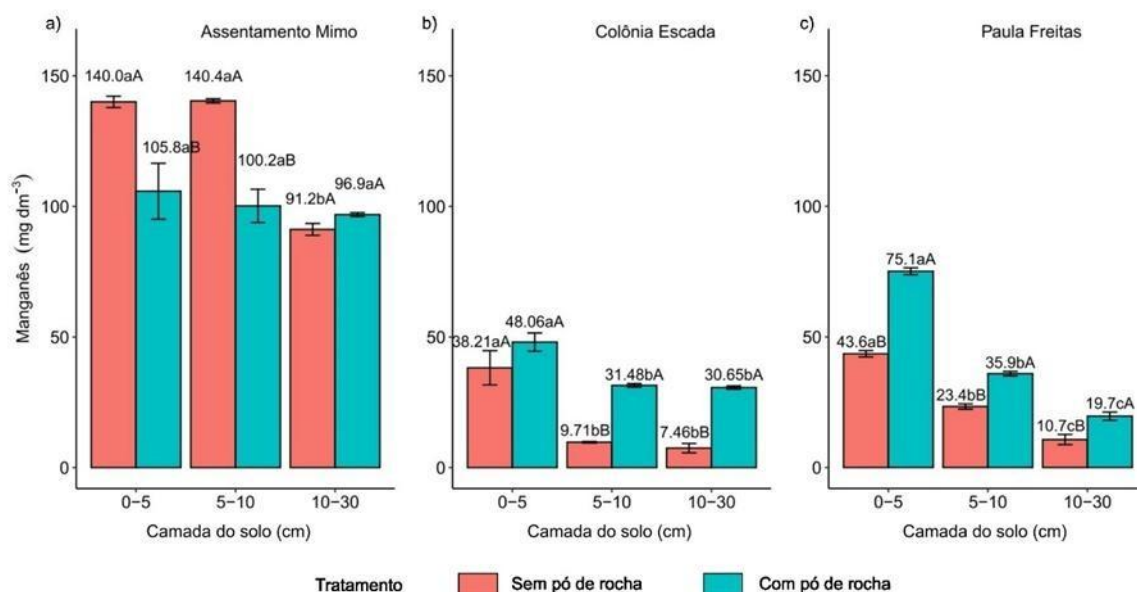
Nesse caso, a associação do remineralizador com gesso agrícola e KCl cria um ambiente de maior mobilidade iônica, favorecendo a redistribuição do Fe no perfil. O longo tempo de uso do insumo é determinante para os altos valores observados, já que o blend contém quantidades significativas de minerais ferrosos que, ao intemperizarem, enriquecem gradualmente o solo.

Esses resultados confirmam que o remineralizador foi efetivo em disponibilizar ferro especialmente nas camadas mais profundas, o que é consistente com a lenta dissolução de minerais como anfibólios e piroxênios, abundantes em rochas máficas (RIBEIRO et al., 2025). Essa dinâmica é relevante em solos tropicais, onde a redistribuição de micronutrientes pode sustentar sistemas agrícolas em médio e longo prazo (CONCEIÇÃO et al., 2022; SILVA et al., 2022; LOUCHESE, 2024).

5.1.14. Manganês

No Assentamento Mimo, o padrão de resposta diferiu. Nas camadas superficiais (0–5 e 5–10 cm), o tratamento sem remineralizador apresentou valores de Mn mais elevados (140,0 e 140,4 mg dm⁻³, respectivamente) em comparação ao tratamento com remineralizador (105,8 e 100,2 mg dm⁻³) (Figura 22a). Essa redução sugere que a aplicação pode ter promovido alterações na dinâmica do elemento, como maior adsorção em sítios da CTC ou diluição em função da maior complexação com outros cátions liberados (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺) provenientes do material aplicado (Kunz et al., 2023). Assim, a disponibilidade medida no extrator caiu, mas isso não implica necessariamente menor suprimento às plantas, já que o sistema orgânico favorece a ciclagem de Mn via matéria orgânica e atividade biológica.

Figura 22. Resultados do manganês nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



No entanto, na camada de 10–30 cm, os valores tenderam à homogeneidade, sem diferenças significativas entre tratamentos (91,2 e 96,9 mg dm⁻³). Esse resultado sugere que, em solos com elevada disponibilidade inicial de manganês, o remineralizador não necessariamente eleva os teores do nutriente, mas pode modular sua redistribuição ao longo do perfil (Nogueira et al., 2021; Assunção et al., 2024).

Na Colônia Escada, observou-se incremento expressivo nos teores de manganês (Mn) nas camadas de 5–10 cm e 10–30 cm com a aplicação do remineralizador, alcançando 31,48 e 30,65 mg dm⁻³, respectivamente, em contraste com os valores significativamente menores no tratamento sem aplicação (9,71 e 7,46 mg dm⁻³) (Figura 22b). Já na camada superficial (0–5 cm), a diferença entre os tratamentos não foi estatisticamente significativa, embora o remineralizador tenha proporcionado aumento médio (48,06 mg dm⁻³) em relação ao controle (38,21 mg dm⁻³).

Esse resultado indica que o blend microgabro + latito contribuiu efetivamente como fonte de manganês nesse ambiente, mesmo com apenas duas aplicações recentes (2020 e 2022). A diferença é coerente com a presença de minerais máficos no insumo, cuja dissolução libera Mn de forma gradual.

Esse comportamento reforça a capacidade do remineralizador em liberar gradualmente micronutrientes para camadas mais profundas do solo, efeito associado à dissolução lenta de minerais máficos presentes no microgabro e no latito (Manning, 2010;

Ribeiro et al., 2025). Estudos prévios apontam que a remineralização pode ampliar a disponibilidade de elementos-traço em subsuperfície, contribuindo para a resiliência da fertilidade em sistemas agrícolas tropicais (Theodoro & Leonardos, 2006; Conceição et al., 2022).

Em Paula Freitas, a aplicação do remineralizador promoveu aumentos significativos em todas as camadas, confirmando o efeito acumulado do uso contínuo do insumo desde 2010. Na superfície (0–5 cm), o teor de Mn praticamente dobrou em relação ao controle, passando de 43,6 para 75,1 mg dm⁻³. O mesmo padrão foi observado nas camadas de 5–10 cm (23,4 para 35,9 mg dm⁻³) e 10–30 cm (10,7 para 19,7 mg dm⁻³) (Figura 22c).

A aplicação conjunta com gesso agrícola pode ter favorecido a mobilidade do Mn no perfil, permitindo incrementos em diferentes camadas.

Esses resultados evidenciam a elevada reatividade do blend de microgabro e latito neste ambiente, liberando manganês de forma consistente e potencializando a fertilidade do solo (Shen et al., 2011). A literatura aponta que a dissolução de minerais primários pode ser acelerada pela ação microbiana, aumentando a fração biodisponível de micronutrientes (Ribeiro et al., 2025), o que pode explicar a resposta positiva neste local.

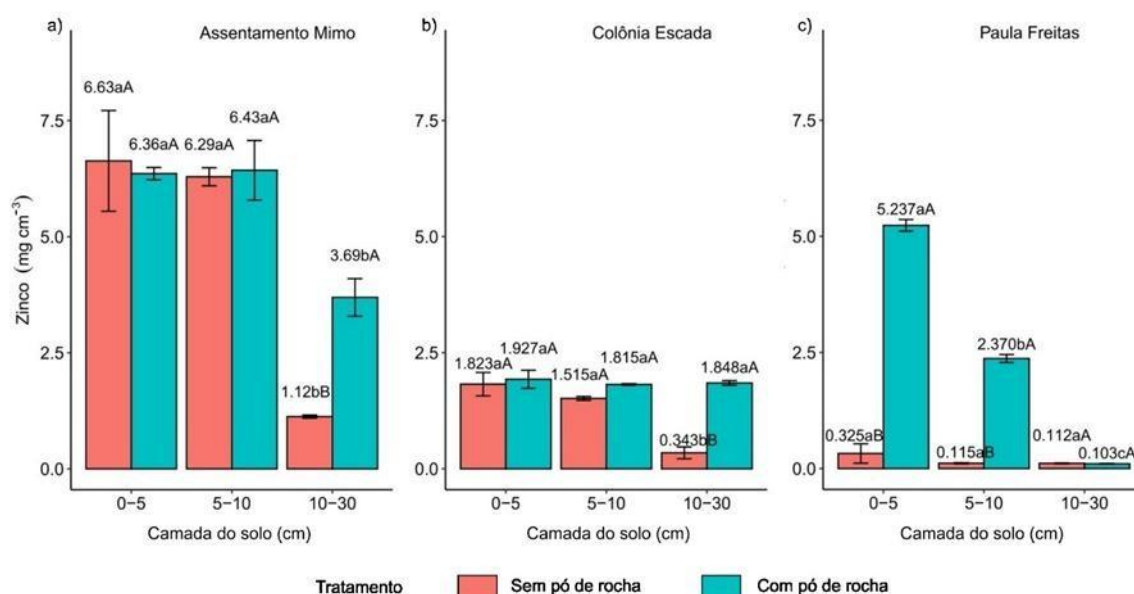
5.1.15. Zinco

No Assentamento Mimo, os teores de Zn foram mais elevados em todas as camadas em relação às demais localidades, variando entre 6,6 mg cm⁻³ (0–5 cm) e 6,4 mg cm⁻³ (5–10 cm), sem diferenças significativas entre tratamentos (Figura 23a). Esses valores indicam solos naturalmente mais férteis em micronutrientes, possivelmente devido ao histórico de uso agrícola (Kabata-Pendias, 2010).

Esse resultado indica que, embora o blend tenha baixo Zn, o uso contínuo do remineralizador, aliado ao manejo orgânico (compostos, adubação verde e maior aporte de resíduos), contribui para a ciclagem e redistribuição do nutriente no perfil. A complexação com matéria orgânica pode explicar o maior Zn extraível em subsuperfície.

Entretanto, na camada de 10–30 cm, o remineralizador proporcionou um incremento relevante (3,69 mg cm⁻³) frente ao solo sem aplicação (1,12 mg cm⁻³), demonstrando maior disponibilidade de Zn em profundidade. Esse padrão está de acordo com estudos que mostram a remineralização como fonte alternativa e sustentável de micronutrientes em sistemas agrícolas, ampliando a biodisponibilidade ao longo do perfil (Theodoro & Leonardos, 2006; Ramos et al., 2015).

Figura 23. Resultados do zinco nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Na Colônia Escada, os teores de Zn variaram pouco entre as camadas superficiais (0–5 cm e 5–10 cm), sem diferença significativa entre tratamentos com e sem remineralizador, mantendo valores próximos de 1,8 a 1,9 mg cm⁻³ (figura 23b). Esse comportamento sugere baixa mobilidade do Zn nessas profundidades, o que é consistente com sua forte ligação a coloides do solo, especialmente em ambientes tropicais intemperizados (Alloway, 2008; Broadley et al., 2012).

Já na camada de 10–30 cm, o remineralizador elevou significativamente os teores de Zn (1,84 mg cm⁻³) em comparação ao solo sem aplicação (0,34 mg cm⁻³), evidenciando aporte de micronutrientes em profundidade. Esse efeito pode estar associado à lenta liberação do Zn por minerais primários presentes no pó de rocha, que liberam cátions metálicos de forma gradual (Leonardos et al., 2000; Manning, 2010).

Mesmo com baixo teor de Zn no blend microgabro + latito, o intemperismo de minerais-traço do insumo e a complexação com matéria orgânica em ambiente menos ácido podem elevar a fração Zn extraível, explicando o incremento observado

Em Paula Freitas, observou-se resposta muito distinta: na camada superficial (0–5 cm), o remineralizador promoveu um aumento expressivo dos teores de Zn (5,23 mg cm⁻³) em comparação ao solo sem aplicação (0,32 mg cm⁻³). Esse mesmo efeito se repetiu na camada de 5–10 cm (2,37 mg cm⁻³ com remineralizador contra 0,11 mg cm⁻³ sem aplicação), mostrando que o material utilizado atuou como importante fonte de Zn. Já em

10–30 cm não foram verificadas diferenças relevantes, permanecendo os valores próximos de $0,1 \text{ mg cm}^{-3}$ em ambos os tratamentos (Figura 23c).

O uso contínuo desde 2010, associado ao gesso agrícola e adubos sintéticos provavelmente favoreceu a liberação e estabilização do Zn no solo. Esse acúmulo pode estar ligado à dissolução prolongada de minerais traço do blend, mas também à ciclagem biológica estimulada pelo manejo. Esse resultado sugere que a liberação do Zn ficou restrita às camadas superficiais, possivelmente pela interação do nutriente com a matéria orgânica do solo e pela baixa mobilidade vertical do elemento (Shen et al., 2011; Nogueira et al., 2021).

5.2. ATRIBUTOA FÍSICOS

5.2.1 Densidade

No Assentamento Mimo, os valores de densidade foram mais elevados no solo sem remineralizador na camada superficial ($0,79 \text{ g cm}^{-3}$) em comparação ao solo com ($0,51 \text{ g cm}^{-3}$), com diferença significativa. Já nas camadas de 5–10 cm e 10–30 cm, as densidades ficaram equilibradas entre tratamentos, variando de $0,758$ a $0,898 \text{ g cm}^{-3}$, sem diferenças estatísticas relevantes (Figura 24a). Esse resultado sugere que, nessa localidade, a aplicação do remineralizador teve efeito benéfico na camada superficial, reduzindo a densidade e indicando possível melhoria estrutural, possivelmente pela disponibilização gradual de cálcio e magnésio, que favorecem a floculação e a agregação estável das partículas do solo (BENEVIDES FILHO et al., 2023). Mas também associado ao manejo orgânico de longa duração, que combina aplicação de compostos, adubação verde, porém com preparo convencional com revolvimento.

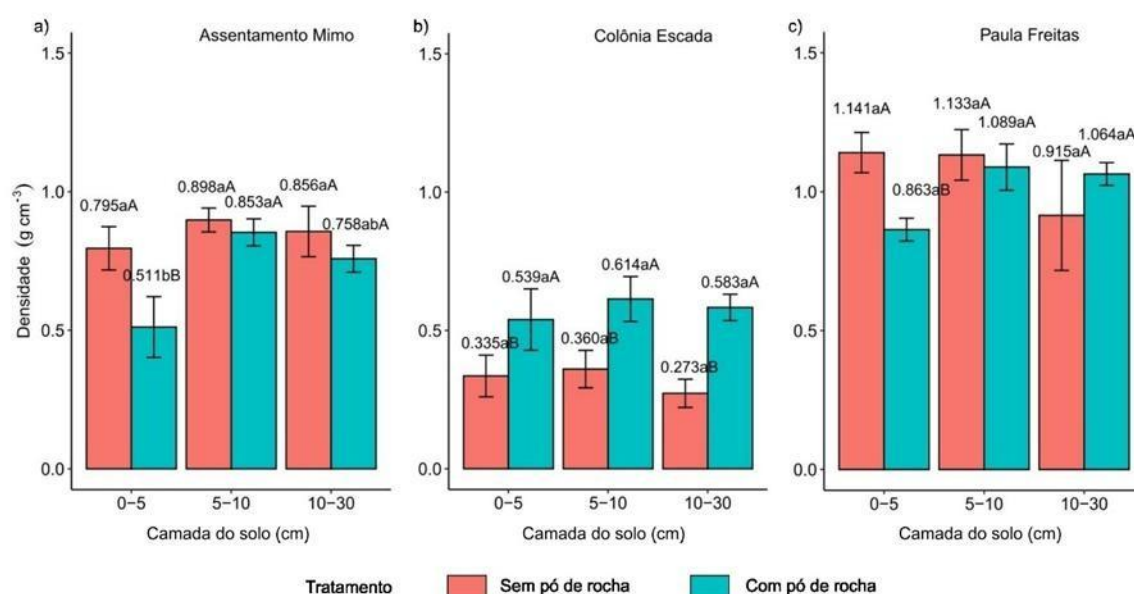
Esse sistema aumenta o aporte de matéria orgânica e favorece a formação e estabilização de agregados, reduzindo a compactação. A literatura aponta que esse processo pode ser intensificado quando associado ao aporte de resíduos orgânicos, que ampliam a estabilidade de agregados (CLARKSON et al., 2024).

Na Colônia Escada, os resultados indicam que a densidade foi consistentemente maior nos solos com aplicação de remineralizador, atingindo valores de $0,54 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 0–5 cm, $0,61 \text{ g cm}^{-3}$ em 5–10 cm e $0,58 \text{ g cm}^{-3}$ em 10–30 cm, em comparação com os valores do solo sem o remineralizador, que variaram entre $0,27$ e $0,36 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 24b).

Na Colônia Escada, o resultado é o reflexo do histórico de preparo intensivo do solo, marcado pelo uso frequente de aração, gradagem e subsolagem. Essas operações,

embora reduzam a compactação logo após a intervenção, promovem a desagregação excessiva do solo, aceleram a decomposição da matéria orgânica e favorecem processos de recompactação mais rápidos. Nesse contexto, o sistema de preparo mecânico torna-se o principal fator de aumento da densidade, uma vez que compromete a estabilidade estrutural e a formação de agregados. O remineralizador, aplicado recentemente, ainda não teve tempo suficiente para contrabalançar os efeitos negativos desse manejo intensivo sobre a estrutura do solo.

Figura 24. Resultados da densidade nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



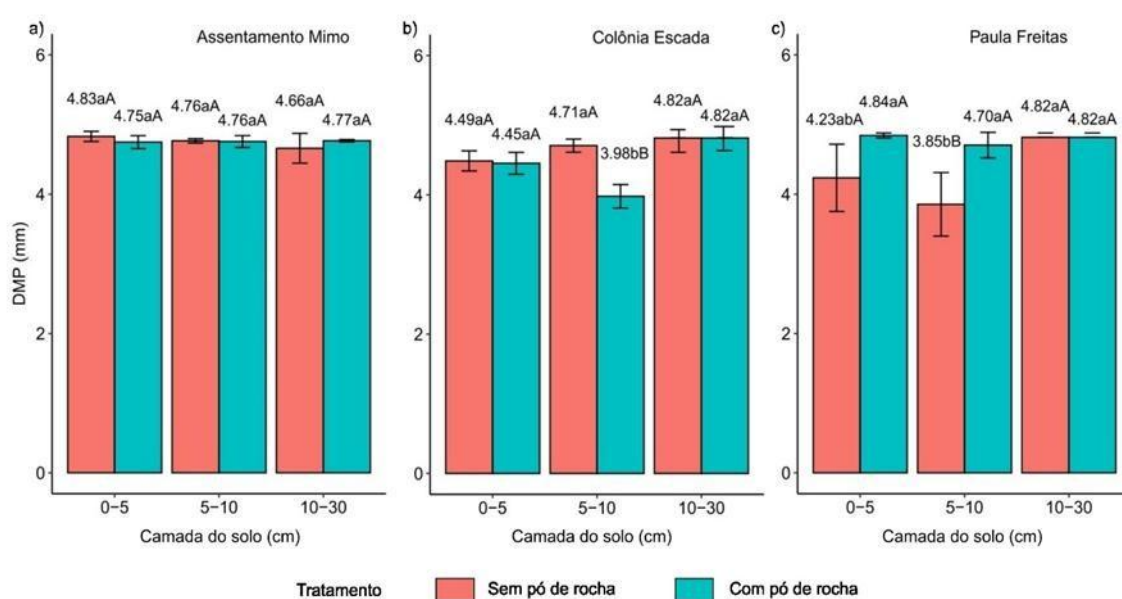
Na área de Paula Freitas, a densidade foi maior no solo sem pó na camada superficial ($1,14 \text{ g cm}^{-3}$), em comparação com $0,86 \text{ g cm}^{-3}$ no solo com pó, diferença significativa. Nas demais camadas (5–10 e 10–30 cm), os valores oscilaram entre $0,91$ e $1,13 \text{ g cm}^{-3}$, sem diferenças relevantes entre os tratamentos (Figura 24c). Esse padrão sugere que, assim como no Assentamento MIMO, a aplicação do remineralizador pode ter favorecido a estruturação do solo superficial, reduzindo sua densidade. Especialmente levando em consideração o tempo de uso do remineralizador, o plantio direto e o preparo do solo. Estudos recentes mostram que a remineralização em solos tropicais, especialmente quando associada à ciclagem biológica, pode melhorar as propriedades físicas por meio da agregação estável, reduzindo a densidade aparente e aumentando a infiltração de água (BEERLING et al., 2023; SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

De modo geral, os resultados indicam que o efeito da aplicação de remineralizadores sobre a densidade do solo não é uniforme entre localidades. Enquanto na Colônia Escada ocorreu aumento da densidade em todas as camadas, no Assentamento Mimo e em Paula Freitas houve redução significativa na camada superficial, sugerindo que a resposta está condicionada às características edáficas locais, manejo do solo, ao tempo de uso do remineralizador utilizado e à interação com a matéria orgânica do solo. Isso confirma que o impacto físico dos remineralizadores deve ser interpretado em médio e longo prazo, estando associado a processos de intemperismo, ciclagem biogeoquímica e manejo integrado do solo (RAMOS et al., 2022; CLARKSON et al., 2024).

5.2.2 Estabilidade de Agregados (Diâmetro Médio Ponderado – DMP)

No Assentamento Mimo, o DMP manteve-se estável entre tratamentos e profundidades ($\approx 4,66$ – $4,83$ mm), indicando ausência de efeito imediato do remineralizador sobre a macroagregação (Figura 25a). Esse padrão é coerente com ensaios de campo que, ao avaliarem propriedades físicas sob enhanced rock weathering (ERW), relatam efeitos modestos no curto prazo e maior probabilidade de mudanças após ciclos de safra e reaplicações (DUPLA et al., 2024).

Figura 25. Resultados da estabilidade de agregados nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Em trabalhos recentes, melhorias de estabilidade de agregados e condutividade hidráulica tornam-se mais nítidas depois de 2–3 anos e/ou quando o pó é integrado com emendas orgânicas (COSTANZO et al., 2025), reforçando a natureza tempo-dependente do processo.

Na Colônia Escada, observou-se DMP elevado e semelhante entre tratamentos nas camadas de 0–5 cm (4,49 vs. 4,45 mm) e 10–30 cm (4,82 vs. 4,82 mm). Entretanto, na camada 5–10 cm houve redução significativa com a aplicação do remineralizador (4,71 vs. 3,98 mm), sugerindo que, naquele estrato, a adição do remineralizador não promoveu ganho imediato de macroagregação (Figura 25b).

Como ambas as parcelas recebem preparo intensivo (aração, gradagem e subsolagem), que normalmente reduz a agregação, o efeito observado pode estar associado ao uso recente do remineralizador (2020 e 2022), que aumentou a saturação por bases e reduziu o Al^{3+} , favorecendo interações entre cátions e coloides que contribuem para a estabilidade dos agregados.

Esse resultado é compatível com a literatura que aponta respostas físicas dependentes do contexto (tipo/dose do pó, textura, manejo do solo e tempo) e possíveis trade-offs estruturais quando a aplicação não é acompanhada de práticas que favoreçam o aporte de C orgânico e a atividade biológica (DUPLA et al., 2024; LEVY et al., 2024).

Ao mesmo tempo, estudos controlados mostram que a aplicação de remineralizadores podem aumentar microagregados por suprimento de Ca e Mg e por formação de minerais secundários, sem necessariamente se traduzir — no curto prazo — em maior DMP de macroagregados (BUSS et al., 2024).

Em Paula Freitas, o remineralizador elevou o DMP na subsuperfície: na camada 5–10 cm o valor passou de 3,85 mm (sem pó) para 4,70 mm (com pó), diferença significativa; nas camadas 0–5 cm e 10–30 cm os valores foram altos e sem diferença entre tratamentos ($\approx 4,7$ – $4,8$ mm) (Figura 25c). Essa resposta positiva na faixa de 5–10 cm está alinhada a evidências de campo, em que o remineralizador aumentou a fração de macroagregados em até 15–25% no topo do perfil, simultaneamente a ganhos de Ca, Mg e C orgânico — mecanismos que favorecem ponte iônica e nucleação mineral para estabilizar agregados (RICHARDSON, 2025).

Em suma, o uso contínuo do insumo desde 2010, associado ao gesso agrícola e ao plantio direto, contribuiu para a melhoria da estrutura, favorecendo a formação de agregados mais estáveis.

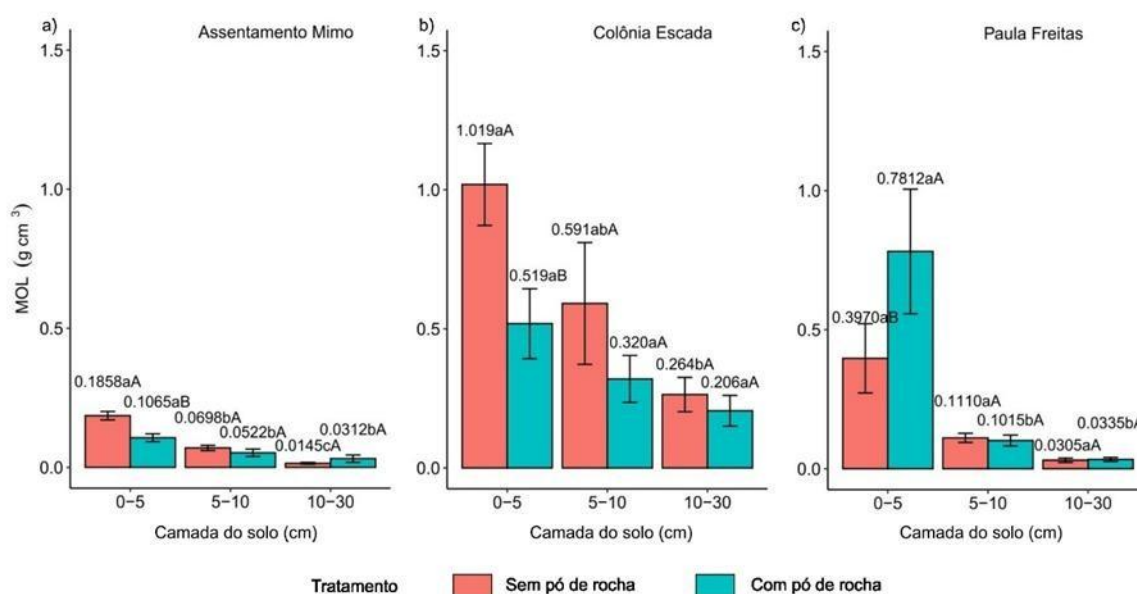
Em paralelo, resultados experimentais mostram que o remineralizador pode promover microagregação rapidamente (semanas a meses), servindo de base para evoluir a macroagregados com o manejo e o tempo (BUSS et al., 2023).

Em síntese, os três locais indicam que o efeito do remineralizador sobre o DMP é heterogêneo e condicionado pelo tempo de uso do remineralizador, solo, textura, matéria orgânica e manejo (OLADELE; CURAQUEO; AWODUN, 2024; COSTANZO et al., 2025). Já em Paula Freitas, a melhora no DMP em 5–10 cm corrobora que há cenários em que o remineralizador acelera a organização estrutural, sobretudo quando há aporte de C e atividade microbiana suficientes para cimentação e crescimento de agregados ao longo do ciclo (RICHARDSON, 2025; BUSS et al., 2024).

5.2.3. Matéria Orgânica Leve em Água – MOL

No Assentamento Mimo, os valores de MOL foram muito inferiores, com concentrações próximas a zero a partir de 5 cm de profundidade. Na camada superficial (0–5 cm), o tratamento sem remineralizador apresentou 0,185 g, significativamente superior ao tratamento com remineralizador (0,106 g). (Figura 26a).

Figura 26. Resultados da matéria orgânica leve em água nas áreas com o remineralizador e sem o remineralizador no Assentamento MIMO (a), Colônia Escada (b) e em Paula Freitas (c). Letras minúsculas indicam diferenças significativas (teste de Scott-Knott; $p \leq 0,05$) entre profundidades dentro de cada tratamento com pó de rocha, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre os tratamentos com pó de rocha dentro de cada profundidade.



Essa diferença sugere que o aporte de carbono lábil foi mais influenciado pela cobertura vegetal local e pela qualidade dos resíduos do que pela aplicação do remineralizador, já que os minerais ainda não contribuíram para uma estabilização de carbono detectável (Bramble et al., 2023; Moraes Sá et al., 2014).

O baixo teor de MOL ao longo do perfil também pode refletir histórico de uso agrícola intensivo e baixa adição de matéria orgânica, condições que favorecem a rápida decomposição da fração leve e a limitação de sua acumulação (Conant et al., 2011). Além disso, em solos de uso intensivo, a MOL é extremamente sensível às mudanças de manejo, funcionando como um indicador precoce de alterações na dinâmica do carbono (Rangel et al., 2008).

Na Colônia Escada, os valores de MOL foram mais elevados na camada superficial (0–5 cm), sobretudo no tratamento sem remineralizador (1,019 g), que diferiu significativamente do tratamento com remineralizador (0,519 g). (Figura 26b). Esse padrão indica que a presença do remineralizador não elevou a fração leve de matéria orgânica no curto prazo, possivelmente devido à lenta dissolução dos minerais aplicados, o que está em consonância com estudos que relatam a necessidade de maior tempo para liberação de nutrientes e interação com a biomassa microbiana (Manning, 2010; Silva et al., 2022).

Nas camadas de 5–10 cm e 10–30 cm, os valores foram menores e não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, o que reforça que a MOL está mais concentrada na superfície, associada ao aporte de resíduos vegetais e à maior atividade biológica (Six et al., 2002; Martins et al., 2023). A redução progressiva da MOL em profundidade é um padrão recorrente em solos tropicais, resultado do gradiente de matéria orgânica e da limitação do aporte de carbono fresco nas camadas mais profundas (Lehmann & Kleber, 2015).

Em Paula Freitas, observou-se comportamento distinto dos demais locais. Na camada de 0–5 cm, houve maior acúmulo de MOL no tratamento com remineralizador (0,781 g), significativamente superior ao tratamento sem remineralizador (0,397 g). (Figura 26c).

Esse resultado sugere que, nesse ambiente, a aplicação do remineralizador favoreceu a formação ou estabilização da matéria orgânica leve, possivelmente por meio da disponibilização gradual de nutrientes e pela promoção da atividade microbiana (Nogueira et al., 2021; Theodoro & Leonardos, 2006; Priyono, J. & Gilkes, R. J., 2008).

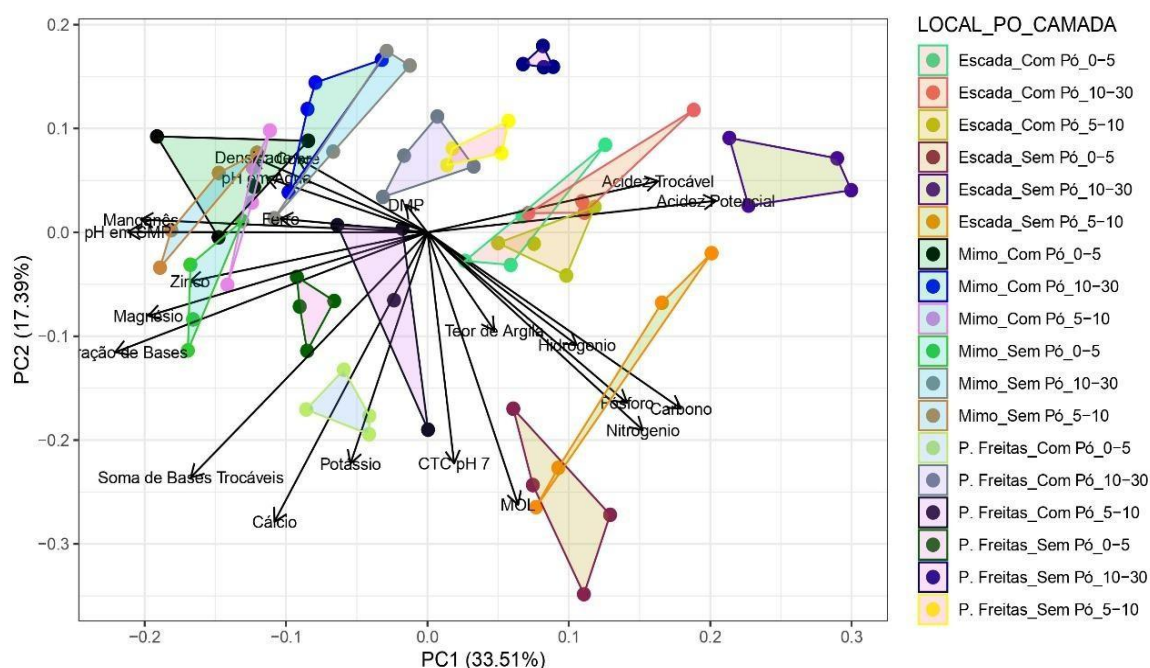
Nas demais camadas, os valores foram baixos e semelhantes entre tratamentos, confirmando que o efeito positivo do remineralizador foi restrito à superfície, onde há maior acúmulo de resíduos orgânicos e interação com microrganismos (Paustian et al., 2016).

Esse resultado pode ser explicado pelo uso contínuo do insumo desde 2010, associado ao gesso agrícola anual e ao sistema de plantio direto, que favorecem a formação de agregados e a proteção da matéria orgânica lábil. Nesse caso, o remineralizador atua de forma indireta, criando condições químicas (pH mais equilibrado, redução do Al^{3+} , aporte de Ca e Mg) que contribuem para a estabilização da MOL. Esses resultados estão alinhados à hipótese de que a combinação entre fontes minerais de liberação lenta e resíduos vegetais pode aumentar o sequestro de carbono em frações mais lábeis, reforçando o papel dos remineralizadores na sustentabilidade agrícola (Martins et al., 2023).

5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DO SOLO

Para explorar e visualizar a variabilidade das amostras de solo, com base em suas características físico-químicas, foi utilizado a Análise de Componentes Principais (PCA). Os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram 50,9% da variância total dos dados (33,51% para a PC1 e 17,39% para a PC2), o que indica a maior parte das relações entre as amostras (Figura 27). A PC1 reflete um gradiente de Acidez e fertilidade do solo e o principal eixo de diferenciação, enquanto a PC2 contribuiu para uma diferenciação secundária, relacionada a características como a Densidade e o teor Potássio.

Figura 27. Distribuição das amostras e direção das variáveis na PCA.



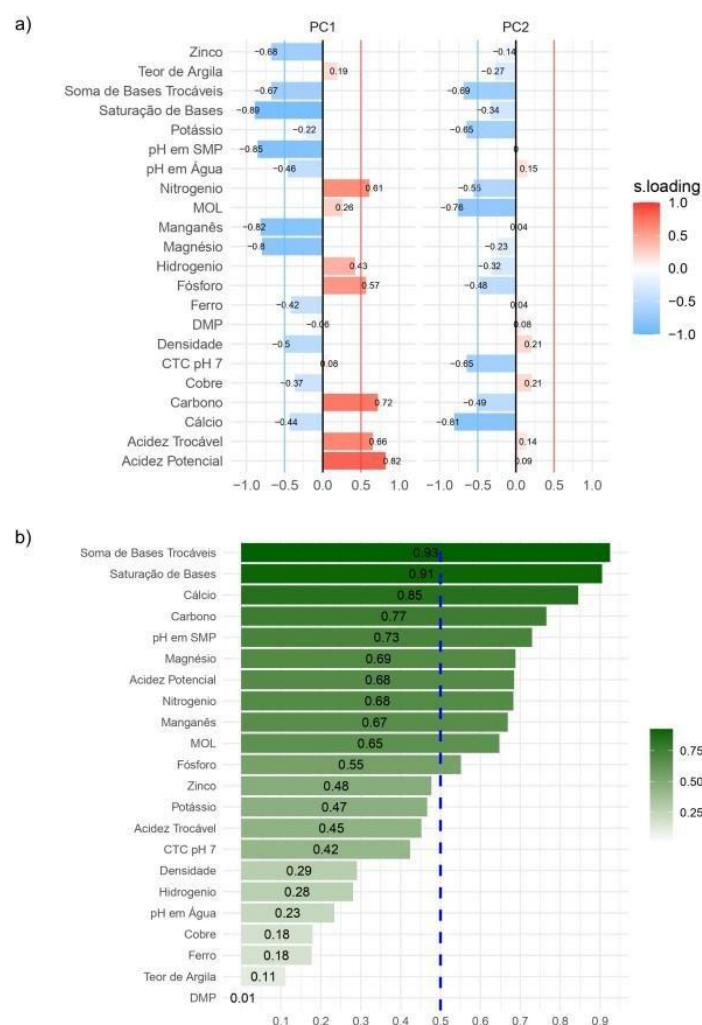
Há uma forte correlação positiva com características de acidez e matéria orgânica, como Acidez Potencial (0,82), Carbono (0,72), Acidez Trocável (0,66) quando analisamos

os pesos das variáveis da PC1 (Figura 28a). Porém, a PC1 apresentou correlações negativas com variáveis associadas à fertilidade e ao teor de bases trocáveis, como Saturação de Bases (-0,89), pH em SMP (-0,85), Manganês (-0,82) e Soma de Bases Trocáveis (-0,67). Essa separação indica que a PC1 é um forte indicador do estado de fertilidade e acidez dos solos estudados. A PC2, por sua vez, demonstrou correlação negativa com Cálcio (-0,81), MOL (-0,76) e Potássio (-0,65), e positiva com Densidade (0,21).

A distribuição das amostras no *biplot* confirmou a separação observada pelos pesos das variáveis (Figura 28a). Os grupos de amostras classificados como Sem Pó de Rocha (de Escada, Mimo e P. Freitas) foram posicionados no lado positivo da PC1, indicando que esses solos são mais ácidos e apresentam maior teor de Carbono e Nitrogênio. Já os grupos Com Pó de Rocha (de Escada, Mimo e P. Freitas) se agruparam no lado negativo da PC1, o que os associa a maiores concentrações de bases trocáveis, como Zinco, Magnésio e Saturação de Bases, sugerindo que esses solos possuem maior fertilidade.

A análise das variáveis por permutação revela uma hierarquia clara da importância das variáveis na determinação da estrutura dos dados (Figura 28b). A análise mostra que a Soma de Bases Trocáveis (0,93), Saturação de Bases (0,91) e o Cálcio (0,85) são as variáveis mais influentes nos solos analisados. A alta importância dessas variáveis, junto com Carbono (0,77) e Magnésio (0,69), reforça a conclusão da PCA de que a fertilidade e o teor de carbono no solo são os fatores primários que diferenciam as amostras. Porém, variáveis como DMP (0,01), Teor de Argila (0,11), Ferro (0,11) e Cobre (0,11) apresentaram uma importância muito baixa, indicando que sua contribuição para a variabilidade geral do conjunto de dados é mínima. A linha pontilhada em 0,5 serve como um bom limiar, destacando as variáveis que têm uma influência moderada a alta (acima de 0,5), como Acidez Potencial (0,68) e Fósforo (0,55), daquelas com influência mais baixa.

Figura 28. Barras dos pesos das variáveis nas duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) (a) e análise das variáveis por permutação, ordenadas da mais para a menos influente (b).



6. ANÁLISE MULTIVARIADA POR FACTOR ANALYSIS FOR MIXED DATA - FAMD

6.1 Análise multivariada dos atributos do solo por FAMD

A análise multivariada por FAMD apresentou boa capacidade de síntese dos dados nas três áreas avaliadas, com as duas primeiras dimensões explicando entre 44,8% e 55,6% da variabilidade total dos atributos do solo. Esse nível de explicação indica que os principais gradientes edáficos foram capturados de forma robusta, permitindo a interpretação integrada das relações entre atributos químicos e físicos do solo, profundidade e uso de remineralizador.

Esse resultado reforça a hipótese central da dissertação de que o uso contínuo de remineralizadores promove alterações graduais e estruturais nos atributos do solo, especialmente ao longo do gradiente de fertilidade identificado pela Dimensão 1. A associação do tratamento com incrementos em saturação por bases, pH e disponibilidade de cátions indica que o pó de rocha atua diretamente sobre os mecanismos que regulam a fertilidade em solos tropicais altamente intemperizados, nos quais a disponibilidade de bases e o controle da acidez são fatores determinantes (NOVAIS et al., 2007; BRADY; WEIL, 2017).

Do ponto de vista mecanístico, esse efeito pode ser atribuído à dissolução progressiva dos minerais silicáticos presentes no remineralizador, com consequente liberação de cálcio, magnésio e potássio, além do consumo de prótons na solução do solo, contribuindo para a redução da acidez e da toxidez por alumínio. Esse processo, diferentemente da adubação convencional, ocorre de forma contínua e de baixa intensidade, promovendo ajustes graduais na química do solo e favorecendo a estabilização dos atributos ao longo do tempo, conforme descrito por Harley e Gilkes (2000) e Martins et al. (2023).

Adicionalmente, a menor dispersão observada no grupo com aplicação de remineralizador no espaço fatorial indica redução da variabilidade química entre as amostras, sugerindo que o insumo atua como um agente de modulação do sistema, promovendo maior homogeneidade nas condições edáficas. No entanto, a magnitude e a direção desses efeitos variam entre as áreas avaliadas, evidenciando que a resposta ao remineralizador é fortemente dependente das condições iniciais do solo, como textura, mineralogia e nível de fertilidade (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

Dessa forma, os resultados indicam que os remineralizadores não atuam apenas como fontes de nutrientes, mas como insumos capazes de influenciar a dinâmica estrutural do sistema solo, com efeitos cumulativos e dependentes do contexto edáfico, contribuindo para a construção da fertilidade em médio e longo prazo, conforme discutido por Van Straaten (2002) e Theodoro e Leonardos (2006).

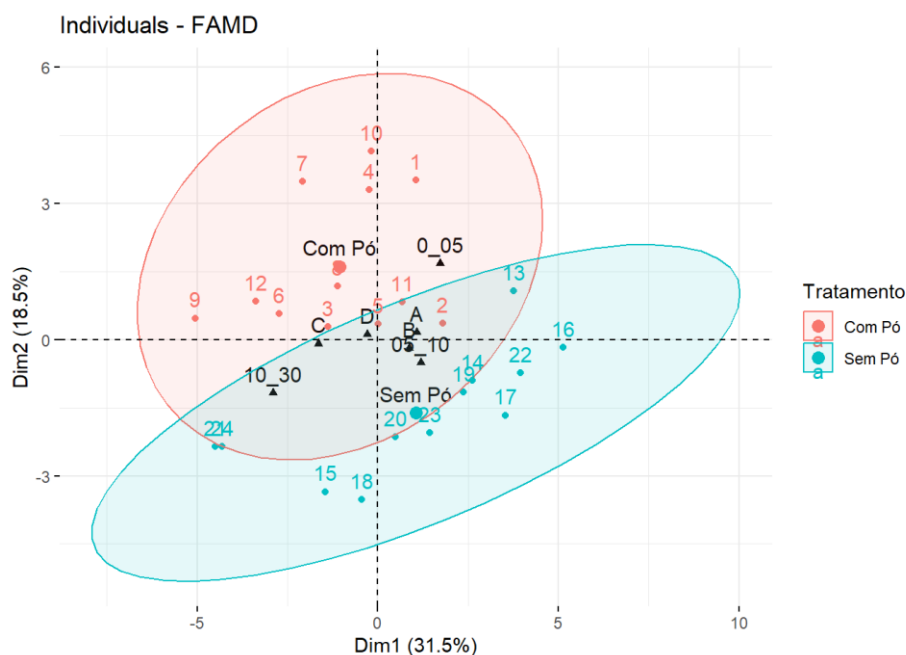
6.1.1 FAMD - Área MIMO

A análise por FAMD para a área MIMO demonstrou que a Dimensão 1 explicou 31,5% da variabilidade total dos dados, sendo estruturada principalmente pelo gradiente de fertilidade do solo, enquanto a Dimensão 2, responsável por 18,5% da variabilidade, esteve associada a atributos como pH, potássio e textura. A separação entre os tratamentos com e

sem aplicação de pó de rocha ocorreu predominantemente na Dimensão 2, indicando que, nesse contexto, o remineralizador influenciou de forma mais expressiva atributos secundários do sistema, sem alterar de maneira substancial o eixo principal de fertilidade.

Conforme observado na Figura 29, os tratamentos apresentam separação moderada ao longo da Dimensão 2, com sobreposição parcial das elipses, evidenciando que parte significativa da variabilidade química é compartilhada entre os grupos. Ainda assim, a tendência de diferenciação indica que o uso do remineralizador promove alterações detectáveis na organização química do solo, ainda que não suficientes para deslocar os tratamentos ao longo do gradiente estrutural de fertilidade.

Figura 29. Análise fatorial de dados mistos (FAMD) dos atributos químicos e físicos do solo na área MIMO, considerando variáveis quantitativas e qualitativas, com e sem aplicação de remineralizador.



Esse comportamento pode ser interpretado à luz do histórico de manejo da área, caracterizada por um sistema orgânico consolidado, com uso contínuo de adubação verde e compostos orgânicos. Essas práticas promovem aporte constante de matéria orgânica e nutrientes, contribuindo para a manutenção de níveis relativamente estáveis de fertilidade e para a autorregulação do sistema solo (ANGHINONI et al., 2021; ANDERSON; INGRAM, 1993). Nesse cenário, o remineralizador não atua como fator de correção primária, mas como agente complementar, influenciando o equilíbrio químico do solo por meio da liberação gradual de cátions e da regulação do pH, conforme descrito para

materiais silicáticos de baixa solubilidade (HARLEY; GILKES, 2000; MARTINS et al., 2023).

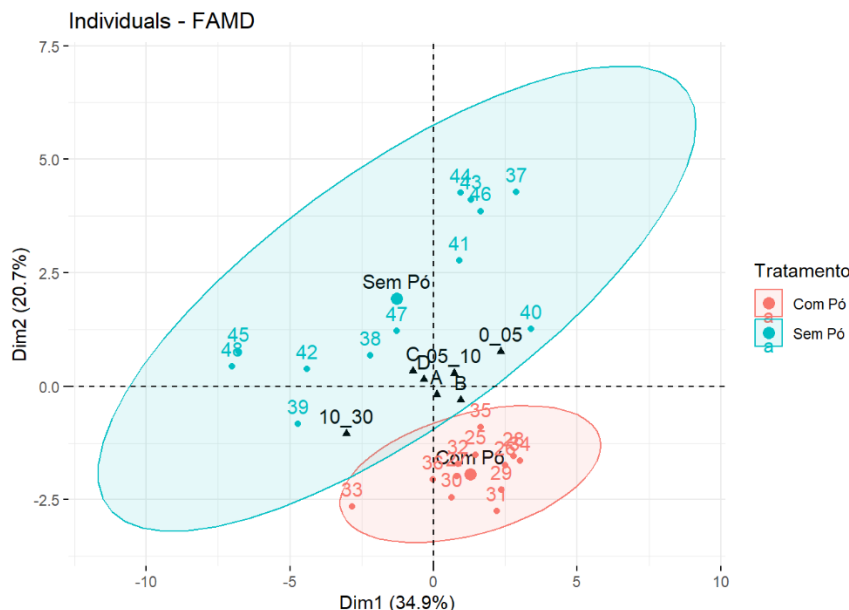
Adicionalmente, a menor dispersão das amostras no tratamento com aplicação de pó de rocha indica redução da variabilidade química no espaço fatorial, sugerindo maior homogeneidade entre as unidades amostrais. Esse padrão reforça a hipótese de que o remineralizador exerce um efeito estabilizador sobre o sistema solo, atuando na modulação dos atributos químicos e contribuindo para a manutenção de condições edáficas mais equilibradas ao longo do tempo, especialmente em sistemas sob manejo orgânico consolidado (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

6.1.2 FAMD - Área Colônia Escada

Na área Colônia Escada, a análise por FAMD apresentou elevada capacidade de explicação da variabilidade dos dados, com 55,6% da variância total representada pelas duas primeiras dimensões, indicando uma estrutura multivariada bem definida. A Dimensão 1 foi caracterizada por um gradiente entre toxidez por alumínio e fertilidade do solo, enquanto a Dimensão 2 esteve associada à capacidade de troca catiônica (CTC) e aos teores de cátions trocáveis, como cálcio, magnésio e potássio, evidenciando a importância dos processos relacionados à retenção e disponibilidade de nutrientes.

Conforme observado na Figura 30, a separação entre os tratamentos com e sem aplicação de pó de rocha ocorre principalmente ao longo da Dimensão 2, indicando que o remineralizador está associado a modificações nos atributos relacionados à CTC e à dinâmica dos cátions no solo. Esse padrão sugere que o efeito do remineralizador se manifesta de forma mais expressiva na capacidade do solo em reter e disponibilizar nutrientes, influenciando diretamente a organização química do sistema, especialmente em solos tropicais onde a CTC desempenha papel central na fertilidade (NOVAIS et al., 2007; HAVLIN et al., 2014).

Figura 30. Análise fatorial de dados mistos (FAMD) dos atributos químicos e físicos do solo na área Colônia Escada, evidenciando a separação entre tratamentos principalmente pela capacidade de troca catiônica e cátions trocáveis.



Adicionalmente, observa-se que o grupo sem aplicação de pó de rocha apresenta maior dispersão no espaço fatorial, refletindo elevada variabilidade química entre as amostras. Em contraste, o grupo com aplicação de remineralizador apresenta distribuição mais concentrada, indicando maior homogeneidade nas condições do solo. Esse comportamento sugere que o remineralizador atua como agente de estabilização química, contribuindo para a redução da variabilidade e para a manutenção de um sistema mais equilibrado, conforme discutido para sistemas submetidos à remineralização (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

Do ponto de vista mecanístico, esse efeito pode ser explicado pelo intemperismo progressivo dos minerais silicáticos presentes no pó de rocha, que promove a liberação gradual de cátions básicos e o aumento de cargas negativas no complexo de troca do solo. Esse processo favorece o incremento da capacidade de troca catiônica e a maior retenção de nutrientes, resultando em um sistema mais tamponado e menos suscetível a variações químicas abruptas ao longo do tempo, conforme descrito por Harley e Gilkes (2000) e Martins et al. (2023).

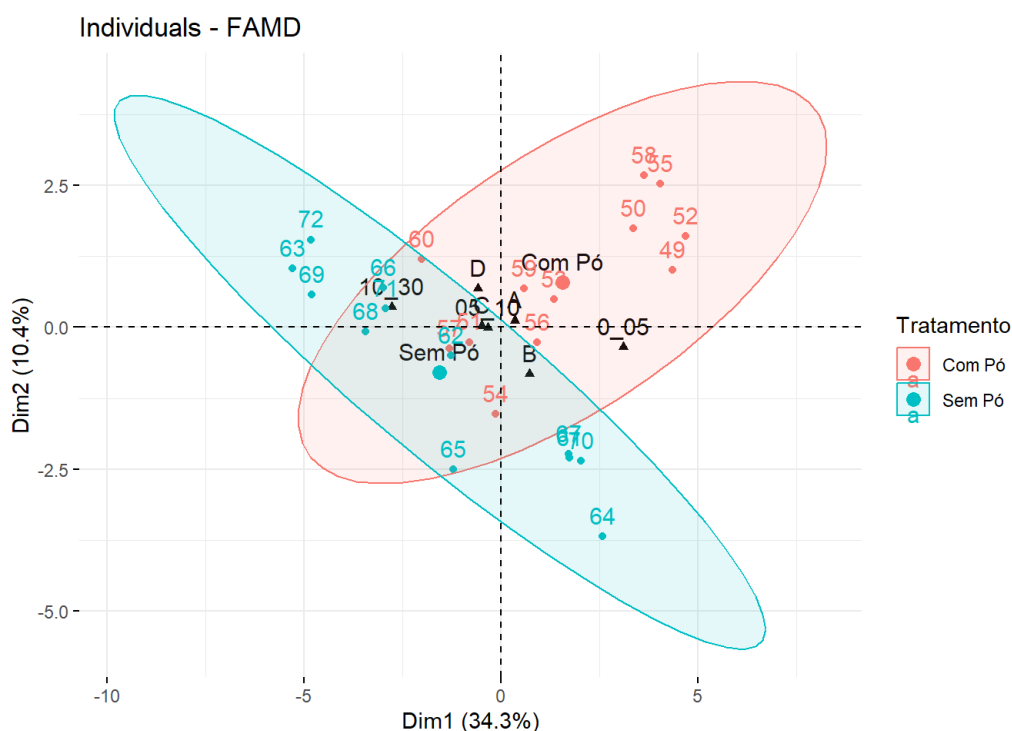
6.1.3 FAMD - Área Paula Freitas

A área Paula Freitas apresentou maior complexidade multivariada, com 44,8% da variabilidade total explicada pelas duas primeiras dimensões, indicando maior

heterogeneidade química do solo e distribuição mais difusa dos atributos no espaço fatorial. A Dimensão 1 manteve-se como o principal eixo de variação, representando o gradiente de fertilidade do solo, no qual o tratamento com aplicação de remineralizador esteve associado ao polo positivo, caracterizado por maiores teores de cálcio e potássio, maior saturação por bases e menores níveis de acidez e alumínio, refletindo os princípios clássicos da dinâmica da fertilidade em solos tropicais (NOVAIS et al., 2007; RONQUIM, 2020).

A separação entre os tratamentos ao longo da Dimensão 1 indica que, nessa área, o remineralizador está diretamente relacionado a alterações no eixo estrutural da fertilidade, evidenciando efeito mais expressivo sobre os atributos químicos centrais do sistema. Conforme observado na Figura 31, embora exista sobreposição parcial entre os grupos, há uma tendência consistente de deslocamento das amostras com aplicação de pó de rocha para condições de maior fertilidade, indicando diferenciação química relevante entre os tratamentos.

Figura 31. Análise fatorial de dados mistos (FAMD) dos atributos químicos e físicos do solo na área Paula Freitas, demonstrando separação entre tratamentos ao longo do gradiente principal de fertilidade do solo.



Esse comportamento pode ser interpretado como resultado do efeito cumulativo do remineralizador ao longo do tempo, considerando o histórico de aplicação contínua desde 2010, associado ao uso de gesso agrícola e fertilizantes minerais. A atuação prolongada

desses insumos favorece a liberação gradual de cátions básicos, a redução da atividade do alumínio e o aumento da saturação por bases, promovendo melhorias progressivas na qualidade química do solo, conforme descrito para sistemas submetidos à remineralização de longo prazo (RAMOS et al., 2015; SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

Além disso, foram observadas alterações em atributos físicos, como redução da densidade do solo e aumento da estabilidade de agregados, indicando que os efeitos do remineralizador não se restringem à química do solo, mas também influenciam sua estrutura, resultado compatível com estudos que apontam a interação entre processos geoquímicos e físicos na formação de agregados e estabilidade estrutural (SIX et al., 2002; COSTANZO et al., 2025).

Esse conjunto de evidências reforça que os remineralizadores atuam como insumos de efeito gradual e acumulativo, cuja eficiência está diretamente relacionada ao tempo de aplicação e à interação com práticas complementares de manejo, contribuindo para a construção da fertilidade do solo em médio e longo prazo, conforme discutido por Van Straaten (2002) e Beerling et al. (2018).

6.1.4 Integração conjunta dos dados por FAMD

A análise conjunta, baseada na Factor Analysis for Mixed Data, evidenciou a existência de uma estrutura multivariada consistente entre as áreas avaliadas, permitindo identificar padrões robustos na organização dos atributos químicos e físicos do solo. De forma recorrente, a Dimensão 1 configurou-se como o principal eixo estruturante, representando o gradiente de fertilidade versus acidez/toxidez por alumínio. Esse gradiente, comum a todas as áreas, confirma que a dinâmica da fertilidade em solos tropicais altamente intemperizados é fortemente controlada pelo equilíbrio entre a disponibilidade de bases (Ca, Mg, K) e a presença de alumínio em formas tóxicas, sendo esse o principal fator limitante à produtividade, uma vez que a acidez do solo e a saturação por alumínio constituem fatores críticos que limitam o desenvolvimento das plantas em solos tropicais (NOVAIS et al., 2007; BRADY; WEIL, 2017).

A profundidade do solo mostrou-se um fator determinante na estruturação desse gradiente, com as camadas superficiais associadas a maiores níveis de fertilidade e as camadas mais profundas relacionadas ao aumento da acidez e da saturação por alumínio. Esse padrão reflete processos pedogenéticos típicos de ambientes tropicais, nos quais a lixiviação de bases e o acúmulo de alumínio em subsuperfície condicionam a distribuição

vertical da fertilidade, independentemente do manejo adotado (RESENDE et al., 2006; RIBEIRO et al., 2013).

Outro resultado consistente foi a diferença na variabilidade interna entre os tratamentos. Em todas as áreas, o grupo sem aplicação de pó de rocha apresentou maior dispersão no espaço fatorial, indicando elevada heterogeneidade química entre as amostras. Em contraste, o grupo com aplicação de remineralizador apresentou distribuição mais concentrada, evidenciando maior homogeneidade. Esse comportamento sugere que o remineralizador atua como agente de modulação do sistema solo, promovendo maior uniformidade nas condições químicas e reduzindo a variabilidade espacial dos atributos, o que está de acordo com a literatura que aponta que o uso de rochas moídas pode contribuir para a melhoria gradual e mais homogênea das propriedades do solo (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

Do ponto de vista funcional, esse padrão permite interpretar o remineralizador como um insumo com múltiplas funções no sistema solo, atuando simultaneamente como regulador químico, estabilizador da fertilidade, condicionador do solo e redutor da variabilidade química. Esses efeitos não estão associados a respostas imediatas, mas a processos graduais de transformação do sistema edáfico, uma vez que a remineralização atua como um processo de construção da fertilidade do solo ao longo do tempo (THEODORO; LEONARDOS, 2006).

Mecanicamente, esse comportamento está relacionado ao processo de biointemperismo, no qual a interação entre minerais, microrganismos e raízes intensifica a dissolução de minerais silicáticos e promove a liberação progressiva de nutrientes. Esse processo contribui para o aumento da capacidade de troca catiônica, a formação de cargas negativas no complexo do solo e a retenção de cátions básicos, sendo que a liberação de nutrientes a partir de minerais silicáticos ocorre de forma lenta e contínua, dependente das condições geoquímicas do solo (HARLEY; GILKES, 2000).

A análise integrada também demonstrou que o efeito do remineralizador é fortemente condicionado pelo contexto edáfico e pelo histórico de manejo, não atuando de forma isolada. A resposta do sistema depende de fatores como fertilidade inicial, textura, mineralogia e tempo de aplicação, o que indica que a eficiência do remineralizador está associada à sua interação com o sistema solo como um todo. Esse aspecto reforça a necessidade de interpretar seus efeitos dentro de uma abordagem sistêmica, considerando as condições específicas de cada área.

Em síntese, os resultados indicam que a remineralização atua como um processo de transformação gradual do sistema solo, promovendo alterações progressivas na dinâmica

química e física, com efeitos cumulativos ao longo do tempo. Esse comportamento reforça o papel dos remineralizadores como insumos estratégicos para a construção da fertilidade em médio e longo prazo, especialmente em solos tropicais com baixa reserva mineral, nos quais a sustentabilidade dos sistemas produtivos depende da manutenção do equilíbrio químico e da estabilidade estrutural do solo.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo confirma a hipótese de que o uso contínuo de remineralizadores, em áreas com diferentes históricos e tempos de usos, promove alterações progressivas e consistentes nos atributos químicos e físicos do solo, especialmente naqueles relacionados à fertilidade, acidez e saturação por bases. Os resultados evidenciam que esses efeitos são dependentes do tempo de aplicação, das características intrínsecas do solo e do sistema de manejo adotado, indicando que a resposta à remineralização ocorre de forma dinâmica e contextualizada, e não como um efeito isolado do insumo.

A análise multivariada por Factor Analysis for Mixed Data (FAMD) demonstrou que a variabilidade dos solos é predominantemente estruturada por um gradiente de fertilidade versus acidez/toxidez por alumínio, o qual se manteve consistente entre as áreas avaliadas. Esse padrão confirma que a limitação química dos solos tropicais altamente intemperizados está diretamente associada à baixa disponibilidade de bases e à elevada atividade do alumínio, sendo a melhoria desses atributos um dos principais caminhos para o aumento da qualidade do solo. Nesse contexto, o remineralizador atua modulando esse gradiente ao longo do tempo, promovendo incremento gradual na saturação por bases, elevação do pH e redução da toxidez por alumínio.

Do ponto de vista mecanístico, esses efeitos estão associados ao intemperismo progressivo dos minerais silicáticos presentes nos remineralizadores, que promove a liberação lenta e contínua de cátions como cálcio, magnésio e potássio. Esse processo contribui não apenas para o fornecimento de nutrientes, mas também para o aumento da capacidade de troca catiônica, a formação de cargas negativas no complexo do solo e a maior retenção de nutrientes, resultando em um sistema mais estável e menos suscetível a perdas por lixiviação.

Além disso, observou-se redução consistente da variabilidade química nas áreas com aplicação de remineralizador, evidenciada pela menor dispersão das amostras no espaço multivariado. Esse resultado indica que o insumo atua como agente de modulação e estabilização do sistema solo, promovendo maior homogeneidade nas condições

químicas e reduzindo a heterogeneidade entre áreas e ao longo do perfil do solo. Tal comportamento sugere um efeito de tamponamento geoquímico, no qual a liberação gradual de nutrientes e a regulação da acidez contribuem para a manutenção de condições edáficas mais equilibradas ao longo do tempo.

Adicionalmente, os resultados indicam que os efeitos da remineralização não se restringem aos atributos químicos, mas também se estendem às propriedades físicas do solo, como densidade e estabilidade de agregados, evidenciando a atuação integrada do remineralizador na melhoria da qualidade do solo. Essa interação entre atributos químicos e físicos reforça a natureza sistêmica dos processos envolvidos, nos quais a melhoria da fertilidade está associada ao aumento da qualidade estrutural do solo.

Outro aspecto relevante é que o efeito do remineralizador se mostrou dependente da interação com outras práticas de manejo, como o uso de matéria orgânica, gesso agrícola e fertilizantes minerais. Isso indica que a remineralização deve ser compreendida como componente de um sistema integrado de manejo da fertilidade, no qual diferentes insumos atuam de forma complementar. Enquanto fertilizantes solúveis promovem respostas rápidas na disponibilidade de nutrientes, os remineralizadores contribuem para a construção gradual da fertilidade e para a estabilidade do sistema em médio e longo prazo.

Dessa forma, conclui-se que os remineralizadores não devem ser interpretados como substitutos diretos de fertilizantes convencionais, mas como insumos estratégicos para a construção da fertilidade do solo em sistemas agrícolas tropicais. Seu principal papel reside na modulação dos processos geoquímicos do solo, na redução da variabilidade química e na promoção de maior estabilidade e resiliência do sistema. Assim, sua utilização se mostra especialmente relevante em sistemas de manejo conservacionistas e agroecológicos, nos quais a sustentabilidade produtiva depende da manutenção do equilíbrio químico, físico e biológico do solo ao longo do tempo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. G. de; CANDIAN, J.; CARDOSO, A. I. I.; GRASSI FILHO, H. Nitrogen, phosphorus, and potassium content of six biofertilizers used for fertigation in organic production system. **Comunicata Scientiae**, v. 12, 2021.

ALOVISI, A. M. T. et al. Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 918-932, 2020.

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. 2. ed. Wallingford: CAB International, 1993. 221 p.

ANTHONY, T. L.; JONES, A. R.; SILVER, W. L.. Supplementing enhanced weathering with organic amendments accelerates the net climate benefit of soil amendments in rangeland soils. **AGU Advances**, 6, e2024AV001480, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024AV001480>

ARAUJO, P. C. et al. Remineralizadores de solos: importância e perspectivas futuras. **Série Tecnologia Ambiental**, n. 122. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2023.

ASSUNÇÃO, R. V. et al. Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275193>

BAMBERG, A. L.; SILVEIRA, C. A. P.; POTES, M. L.; PILLON, C. N.; LOUZADA, R. M.; CAMPOS, A. D. S. Dinâmica de liberação de nutrientes disponibilizados por rochas moídas em colunas de lixiviação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011.

BASAK, B. B.; OLIVEIRA, B.; NAIDU, R. Environmentally safe release of potassium and micronutrients from organically altered rock mineral powder. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 43, p. 3273–3286, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00677-1>.

BATISTA, N. T. F.; RAGAGNIN, V. A.; HACK, E.; GORGEN, A. L.; MARTINS, E. S. Protocolo para avaliação da eficiência agronômica de remineralizadores de solo: uma proposta da Embrapa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 3., 2016, Pelotas, RS. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2017. p. 219-237.

BEERLING, D. J. et al. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. **Nature Plants**, v. 4, p. 138-147, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108y>.

BEERLING, D. J.; EPIHOV, D. Z.; KANTOLA, I. B.; et al. Enhanced weathering in the U.S. Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 36, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2319436121> BENDER, S. F.; WAGG, C.; HEIJDEN, M. G. A. van der. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 31, n. 6, p. 440-452, 2016.

BENEVIDES FILHO, P. R. R.; RAMOS, C. G.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; HOWER, J. C. Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region). **Minerals**, v. 13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101255>

BERGMANN, M.; HOFF, R.; THEODORO, S. M. D. C. H. Rochagem: viabilizando o uso sustentável dos descartes de mineração no Distrito Mineiro de Ametista do Sul (DMAS), RS, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2009, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Cerrados, 2009.

BRAMBLE, S. E. et al. Formation of mineral-associated organic matter in temperate soils is primarily controlled by mineral type and modified by land use and management intensity. **Global Change Biology**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17024>

BRASIL. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016**. Regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 11 mar. 2016. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=317444>.

BRASIL. **Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013**. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como categoria de insumo destinado à agricultura e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 11 dez. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-316-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf>. Acesso em: out. 2023. Brasil. (2022). Plano Nacional de Fertilizantes 2050. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumosagropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016**. *Diário Oficial da União*: Seção 1, Brasília, DF, n. 48, p. 7-8, 11 mar. 2016.

BRITO, R. S. et al. Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological (SAJEBTT)**, Rio Branco, v. 6, n. 1, p. 528-540, 2019.

BROADLEY, M. R. et al. **Function of nutrients**: micronutrients. In: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>

BUSS, W.; WITTMANN, O.; SUPRAYOGI, S.; et al. Stabilisation of soil organic matter with rock dust partially counteracted by plants. **Global Change Biology**, 2023. DOI: 10.1111/gcb.17052. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17052>

CAMARA, G.R.; FAITANIN, B.X.; SILVEIRA, L.L.L.; CHIODI FILHO, C.; SANTOS, E.S. Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem – Parte I. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021. **Série Rochas e Minerais Industriais**, v. 30, p. 71.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 123-130, 1994.

CARVALHO, A. M. X.; CARDOSO, I. M.; THEODORO, S. H. M.; SOUZA, M. E. P. Rochagem: o que se sabe sobre essa técnica? In: CARDOSO, I. M.; FÁVERO, C. (Orgs.). **Solos e agroecologia**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 101-128. (Coleção Transição Agroecológica, v. 4).

CARVALHO, A. M. X.; DELIBERALI, D. C.; CARDOSO, I. M. Efeito da rochagem no crescimento e nutrição de plantas de soja sob manejo agroecológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2009, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa, 2009. p. 183-189.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM. **Caracterização tecnológica de minérios**. Capítulo 3. Comunicação técnica elaborada para a 4. ed. do livro *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 55-109.

CHAUDHARY, M.; SINGH, B. R.; KROGSTAD, T.; HEIM, M. Release of Copper, Zinc, and Manganese from Rock Powder with Organic Materials Applied to Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 21, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.614042>

CHURCHMAN, G. J.; SINGH, M.; SCHAPEL, A.; SARKAR, B.; BOLAN, N. Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. **Clays and Clay Minerals**, v. 68, p. 135-143, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00071-z>.

CLARKSON, M. O.; EVANS, D.; MANNING, D. A. C.; et al. A review of measurement for quantification of carbon dioxide removal by enhanced weathering in soil. **Frontiers in Climate**, v. 6, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1345224>

COLA, G. P. A.; SIMÃO, J. B. P. Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 4, p. 15-27, 2012.

CONANT, R. T. et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology**, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>

CONCEIÇÃO, L. T. et al. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100443>

COSTA JUNIOR, C.; PÍCCOLO, M. D. C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B. D.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no Bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1311-1322, 2012.

COSTANZO, S. A.; HOLZER, I. O.; MOONILALL, N. I.; et al. Preliminary assessment of crushed rock, compost, and biochar amendments on soil physical properties. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/ael2.70028>

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; OLIVEIRA, M. L. S.; OLIVEIRA, L. F. S.; SCHNEIDER, I. A. H.; KAUTZMANN, R. M. Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: Evidence of sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120432, 2020a. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120432>.

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; PLATA, L. G.; COSTA, M. L.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, L. F. S. Understanding the mobility of potential nutrients in rock mining byproducts: an opportunity for more sustainable agriculture and mining. **Science of the Total Environment**, v. 710, p. 136240, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136240>

DALY, A. B. et al. A holistic framework integrating plant–microbe–mineral regulation of soil bioavailable nitrogen. **Biogeochemistry**, v. 156, p. 253–279, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00793-9>

DANTAS, M. V. B.; NOGUEIRA, E. S.; VILELA, G. F.; PAIM, F. A. de P. Potencial de uso de remineralizadores de solo no estado de São Paulo. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16., 2022, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. p. 1-12. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1146300>.

DUPLA, X. et al. Let the dust settle: Impact of enhanced rock weathering on soil biological, physical, and geochemical fertility. **Science of the Total Environment**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176297>

EDWARDS, D. P. et al. Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. **Biology Letters**, v. 13, n. 4, p. 20160715, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0715>.

ELISA, A. A.; NINOMIYA, S.; SHAMSHUDDIN, J.; ROSLAN, I. Alleviating aluminum toxicity in an acid sulfate soil from Peninsular Malaysia by calcium silicate application. **Solid Earth**, v. 7, p. 367–374, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-7-367-2016>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p. (Embrapa-CNPQ. Documentos, 1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 745 p. EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FINLAY, R. D. et al. Reviews and syntheses: biological weathering and its consequences at different spatial levels – from nanoscale to global scale. **Biogeosciences**, v. 17, n. 6, p. 15071533, 2020. Doi: <https://doi.org/10.5194/bg-17-1507-2020>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT Statistical Yearbook – World Food and Agriculture 2023**. Rome: FAO, 2023. 384 p. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e04f2b482fc-4740-8cd5-9b66f5335239/content>.

FYFE, W. S.; LEONARDOS, O.H.; THEODORO, S.H. Sustainable farming with native rocks: The transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 78:715-720, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400007>

GIANINAZZI, S. et al. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. **Mycorrhiza**, v. 20, n. 8, p. 519-530, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00572-0100333-3>.

GILLMAN, G. P.; BURKETT, D. C.; COVENTRY, R. J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, n. 1, p. 799-811, 2001. Doi: <https://doi.org/10.1071/SR00073>.

GOTZ, L. F.; CASTAMANN, A.; PIOVESAN, F.; ANZOLIN, B. L.; HEREK, T. A.; MIKOANSKI, W. M.; RITA, Y. L. Uso de pó de rocha associado ao esterco bovino em Latossolo Vermelho cultivado com trigo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 9, n. 2, p. 131-139, 2019. Doi: <https://doi.org/10.21206/rbas.v9i2.3464>.

GUDBRANDSSON, S.; WOLFF-BOENISCH, D.; GISLASON, S. R.; OELKERS, E. H. An experimental study of crystalline basalt dissolution from pH 2 to 11 and temperatures from 5 to 75 °C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 75, p. 5496-5509, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.06.035>.

HANGX, S. J. T.; SPIERS, C. J. Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO₂ concentrations: a critical analysis of viability. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 3, n. 6, p. 757-767, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.07.001>.

HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, pg. 11-36, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>

KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants**. Ed 4. CRC Press, 2010.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1 – physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: ASA-SSSA, 1986. p. 425-442.

KORCHAGIN, J.; CANER, L.; BORTOLUZZI, E. C. Variability of amethyst mining waste: a mineralogical and geochemical approach to evaluate the potential use in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 749-758, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.039>

KUNZ, T. R. et al. Atributos químicos do solo após aplicação de pó de rocha basáltica associado a plantas de cobertura no cultivo do feijão em sucessão. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**. V. 16, n. 49, pg. 3704-3718, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n49-013>

KUŚMIERZ, S. et al. Soil organic carbon and mineral nitrogen contents in soils as affected by their pH, texture and fertilization. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 267, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; RIBEIRO, R. C. C. Fertilização natural: rochagem, agricultura orgânica e plantio direto – breve síntese conceitual. In: **Rochagem e agricultura sustentável**. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p. 149-160.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1038/nature16069>.

LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B. I. Rochagem: o método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976.

LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H.; ASSAD, M.L. Remineralization for sustainable agriculture: a tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, p. 11-22, 2000.

LEVY, C. R.; BEERLING, D. J.; REINHARD, C. T.; et al. Enhanced Rock Weathering for Carbon Removal – Monitoring and Mitigating Potential Environmental Impacts on Agricultural Land. **Environmental Science & Technology**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c02368>

LIMA, A. M.; CUNHA, D. O.; FARIAS, E. O. S.; LEMES, J. B.; RAMOS, Y. C.; SANTOS, N. M. Atributos químicos de solos submetidos ao uso de remineralizador silicático. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 4., 2021, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2021.

LUCHESSE, A. V. et al. Use of quarry waste basalt rock powder as a soil remineralizer to grow soybean and maize. **Heliyon**, v 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14050>

LUCHESSE, A.V. et al. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, v 17, 487-497. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15234>

MACHADO, R. V.; ANDRADE, F. V.; PASSOS, R. R.; RIBEIRO, R. C. D. C.; MENDONÇA, E. S.; MESQUITA, L. F. Characterization of ornamental rock residue and potassium liberation via organic acid application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150481, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150153>

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MANCUSO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A. Produtividade, nutrição e exportação de macronutrientes pela cultura do café arábica em razão de fontes e doses de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1448-1456, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>

MANNING, D. A. C. Mineral sources of potassium for plant nutrition: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 30, p. 281-294, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1051/agro/2009023>.

MANZONI, S.; COTRUFO, M. F. Mechanisms of soil organic carbon and nitrogen stabilization in mineral-associated organic matter – insights from modeling in phase space. **Biogeosciences**, v. 21, p. 4077–4098, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-4077-2024>

MARTINS, E. de S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, p. 26-39, 2023. Disponível em:

<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1156783>

MARTINS, E. S. et al. Produção brasileira de remineralizadores e fertilizantes naturais: 2019 a 2023. **Revista Novosolo**, Ed 6, 2024.

MARTINS, V. et. Al. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical proprieties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 39, n. 1, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150587>

MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; DIAS, F. O.; BARBOSA, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 3, p. 471-476, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S004459672012000400004>.

NETO, J. B. **Aproveitamento do pó de rocha basáltica proveniente da atividade mineral na forma de resíduo para a aplicação na técnica de rochagem utilizada na agricultura**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

NOGUEIRA, T. A. R. et al. Nepheline syenite and phonolite as alternative potassium sources for maize. **Agronomy**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071385>

NOVAIS, R. F. et al. **Fósforo**. Fertilidade do Solo. Viçosa: SBCS, 2007.

OLADELE, S. O.; CURAQUEO, G.; AWODUN, M. A. Co-amendment of silicate dust and manure improves soil health metrics and crop yield in coarser-textured more than mediumtextured soils. **Geoderma Regional**, v. 39, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00887>.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; et al. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, p. 49-57, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature17174>

PRIYONO, J.; GILKES, R. J. (2008). Dissolution kinetics of milled-silicate rock fertilizers in organic acid. **Journal of Tropical Soils**, 2008. DOI: <https://doi.org/10.5400/jts.2008.v13i1.110>

RAHMAN, M. A. et al. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 10, p. 3073, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19103073>

RAMOS, C. G. et al. A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. **Science of the Total Environment**. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.070>

RAMOS, C. G. et al. Caracterização de rocha vulcânica ácida para aplicação em rochagem. **Comunicações Geológicas**, v. 101, p. 1161-1164, 2014.

RAMOS, C. G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; THEODORO, S. H. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>

RAMOS, C. G.; MEDEIROS, D. S.; GÓMEZ, L.; OLIVEIRA, L. F. S.; SCHNEIDER, I. A. H.; KAUTZMANN, R. M. Avaliação do remineralizador do solo a partir de subprodutos da

mineração de rochas vulcânicas: prova experimental utilizando aveia preta e culturas de milho. **Natural Resources Research**, v. 29, n. 3, p. 1583-1600, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09529-x>.

RAMOS, C. G.; QUEROL, X.; DALMORA, A. C.; PIRES, K. C. J.; SCHNEIDER, I. A. H.; SILVA, L.; KAUTZMANN, R. M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 27002709, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.006>.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.. Soil organic carbon and total nitrogen as related with coffee spacing. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008.

RESENDE, A.V.; MACHADO, C.T.T.; MARTINS, É.S.; SENA, M.C.; NASCIMENTO, M.T.; SILVA, L.C.R.; LIONHARES, N.W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Espaço & Geografia**, 9, 135-161, 2006.

RESENDE, M. et al. **Mineralogia de solos brasileiros**: interpretação e aplicações. UFLA, 2006.

RIBEIRO, C. F.; OLIVEIRA, M. R.; ALMEIDA, J. A.; SEQUINATTO, L. Mineralogia e propriedades químicas de solos do Planalto Norte Catarinense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

RIBEIRO, M. C. et al. Basalt rock dust as a soil remineralizer in upland rice grown in tropical soils: residual effects on soil fertility, Si availability and leaf anatomy. **Journal of Cleaner Production**, v. 520, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146063>

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability: Update on Microbial Phosphorus. **Plant Physiology**, v. 156, Issue 3, pg. 989-996, July, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>

RICHARDSON, J. B. Basalt rock dust amendment on soil health properties and inorganic nutrients - Laboratory and field study at two organic farm soils in New England, USA. **Agriculture**, v. 15, n. 1, 52, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15010052>

SÁ, J. C. M. et al. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v 136, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.010>

SANTANA, A. J. B. et al. Remineralização de solo agrícola: estudo das alterações químicas decorrentes de intemperismo acelerado. **Revista ARACÊ**, v. 7, n. 3, p. 12227-12240, 2025. Doi: <https://doi.org/10.56238/arev7n3-120>

SANTANA, A. J. P. Remineralization of agricultural soil: study of chemical changes resulting from accelerated weathering. **Revista Arace**, v. 7, n. 3, p.12227-12240, 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n3-120>

SANTOS CAITANO, T. B. et al. A remineralização de solos como iniciativa ao desenvolvimento sustentável. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, e45101421516, 2021. Doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21516>

SANTOS, E. S.; NEVES, M. A.; CAMARA, G. R. Pó de rocha oriundo da lavra e do beneficiamento de rochas ornamentais como remineralizador de solos agrícolas. In: COSTA, A. V. et al. (Orgs.). **Tópicos especiais em agroquímica II**. Vitória, ES: UFES, 2022. p. 14-36.

SCHUILING, R. D.; KRIJGSMAN, P. Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO₂. **Climatic Change**, v. 74, p. 349-354, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10584005-3485-y>.

SECRETARIA ESPECIAL DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS (SAE). **Produção nacional de fertilizantes**. Brasília, DF: SAE, 2 jul. 2020. Disponível em:

https://www.gov.br/planalto/ptbr/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudosestrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Questões mais comuns em consultas sobre remineralizadores de solos**. Disponível em:

<https://www.cprm.gov.br/remineralizadores/media/faq.pdf>.

SHAMSHUDDIN, J.; ANDA, M. Enhancing productivity of Ultisols and Oxisols in Malaysia using basalt and/or compost. **Pedologist**, v. 55, n. 3, p. 382-391, 2012. Doi: https://doi.org/10.18920/pedologist.55.3_382.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965. Doi: <https://doi.org/10.2307/2333709>.

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONÇALVES, L. S. A. **AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences**. R package version 1.3.6. [S.l.]: CRAN, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>. doi: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.AgroR>

SHEN, J. et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 9971005, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>

SILVA, A. P. et al. Mineralogical analysis of rock dust for remineralization of soil intended for pasture. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.2, p.1-13, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0001>

SILVA, D. R. G.; MARCHI, G.; SPEHAR, C. R.; GUILHERME, L. R. G.; REIN, T. A.; SOARES, D. A.; ÁVILA, F. W. Caracterização e liberação de nutrientes de rochas silicáticas e suas alterações nos atributos químicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 951–962, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300025>. academicjournals.org/+6

SILVA, R. C.; FERREIRA, E. P.; AZEVEDO, A. C. Weathering features of a remineralizer in soil under different land uses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 56, e01442, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01442>.

SILVA, V. J. A. et al. Avaliação dos caracteres agrônômicos da soja tratada com doses crescentes de pó de rocha. In: COLÓQUIO ESTADUAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR, 4.; CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR, 2., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 6.

SIX, J.; CONANT, R. T.; et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v 241, p. 155-176, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

SOARES, G. J. **Influência da rochagem no desenvolvimento de sistemas agroflorestais e na captura de dióxido de carbono atmosférico**. 2018. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SOARES, G. J.; THEODORO, S. H.; CARVALHO, A. M. X. O potencial dos remineralizadores de solos e dos sistemas agroflorestais para ampliar a captura de CO₂. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 4., 2021, [on-line]. Anais... Rio de Janeiro: Autografia; SGB, 2021. p. 98–106. ISBN 978-85-518-3267-7. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/remineralizadores/media/anais_ivcbr_2021.pdf

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (eds). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2ª ed. Brasília: Embrapa, 2017.

SOUZA, F. N. S.; SANTANA, A. P.; ALVES, J. M.; SILVA, M. H. M. Efeitos de um remineralizador de solos (biotita-xisto) na produção de duas variedades de mandioca. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 12, n. 1, p. 45-59, 2016.

SOUZA, M. E. P.; CARDOSO, I. M.; CARVALHO, A. M. X.; LOPES, A. P.; OLIVEIRA, I.; JUCKSCH, I.; JANSSEN, A. Rock powder can improve vermicompost chemical properties and plant nutrition: an on-farm experiment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1418372>

SOUZA, M. E. P.; CARVALHO, A. M. X.; DELIBERALI, D. C.; JUCKSCH, I.; BROWN, G. G.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, I. M. Vermicomposting with rock powder increases plant growth. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 56-60, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.01.016>

SOUZA, W. dos S. et al. Soil carbon sequestration under N fertilized or mixed legume-grass pastures depends on soil type and prior land-use. **Geoderma Regional**, v. 39, e00876, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00876>

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of the Total Environment**, 3, 807, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>

TAVARES, L. F.; CARVALHO, A. M. X.; CAMARGO, L. G. B.; PEREIRA, S. G. F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 7, p. 89-98, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

THEODORO, S. H. et al. Efeito do uso da técnica de rochagem associada à adubação orgânica em solos tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013. v. 1, p. 32–42. Disponível em: https://remineralize.org/wp-content/uploads/2015/10/CBR_29.pdf

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 715720, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400007>

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 721-730, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400008>.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G.. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço & Geografia**, v. 9, 2006. DOI: <https://doi.org/10.26512/2236-56562006e39794>

VAN STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 731-747, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400009>.

VAN STRAATEN, P. **Rocks for Crops: agrominerals of sub-Saharan Africa**. Nairobi: ICRAF, 2002. 338 p.

VIANA, L. S. B. et al. A remineralização de solos como iniciativa ao desenvolvimento sustentável. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21516>

WILLER, H.; TRAVNICEK, J.; MEIER, C.; SCHLATTER, B. **O mundo da agricultura orgânica: estatísticas e tendências emergentes 2021**. Bonn: Instituto de Pesquisa em Agricultura Orgânica FiBL; IFOAM, 2021. 340 p. Disponível em: <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1150-organicmundial-2021.pdf>

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. Doi: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 28, n. 5, p. 337-351, 1936. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>.

ZHAN, Y.; ZHANG, C.; WANG, J.; et al. Soil Aggregate Construction: Contribution from Functional Soil Amendment Fertilizer Derived from Dolomite. **Sustainability**, v. 14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912287>

ZHANG, Q.; PENG, X.; ZHU, H. Conquering soil acidification: the synergistic effects of basalt powder, lime, and PAM. **EGUsphere**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-20241870>

ANGHINONI, I. *et al.* Systemic soil fertility as a product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, e0200140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200140>

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The future of food and agriculture: trends and challenges*. Rome: FAO, 2017.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

RONQUIM, C. C. *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais*. Campinas: Embrapa, 2020.

RONQUIM, C. C. *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais*. Campinas: Embrapa Tropical, 2020. Disponível em:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1128267/1/5840.pdf>

HINSINGER, P. *et al.* Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, v. 237, p. 173–195, 2001.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 15. ed. Pearson, 2017.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. 8. ed. Pearson, 2014.

ANEXOS

Anexo 1 - Análises litogeoquímica do blend 70:30, do Latito e do Microgabro



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ2314048

INFORMAÇÕES DO CLIENTE

NOME
REVESTICAL EXTRAÇÃO E COMÉRCIO DE PEDRAS LTDAATTN.
Fábio Jr. Pereira da SilvaENDERECO:
RODOVIA BR 476 S/N KM 348, COL LUZIA, FAZENDA PASSO DO IGUAÇU ÁREA RURAL 84630000 PR PAULA FREITASCPF/CNPJ
81.874.265/0002-00

REFERÊNCIA DO LOTE DE AMOSTRAS

REF. CLIENTE
Pedido 22/09/2023QTE. AMOSTRAS
3RECEBIDO
05/10/2023PRODUTO
NAO_INFORMADOCOMPLETADO
14/11/2023PROJETO
DefaultEMITIDO
14/11/2023

REFERÊNCIA ANALÍTICA

HID

CVA02B: Determinação de Hg por Geração de Vapor Frio

ICPOM

ICM14B: Determinação por Digestão com Água Régia - ICP OES / ICP MS

PREP

DRY60: Secagem de amostras à 60°C

PREPQC: Controle de Qualidade - Preparação Física

PULV250: Pulverização de 250 g de amostra em moinho de aço a 95% <150#

XRA

PHY01E: Determinação de Perda ao Fogo (LOI) por Gravimetria - 1000°C

XRF79C: Fusão com tetraborato de Lítio - XRF

NOTAS

Laboratório Cadastrado MAPA nº MG-00358.

LEGENDA: SIGLAS

L.D. = Limite de Detecção

BLK = Branco

REP = Replicata

DUJ = Duplicata

L.N.R. = Listado e não Recebido

I.S. = Amostra Insuficiente

N.A. = Não Analisado

STD = Padrão

I.N.F. = Não reportado devido a interferentes

OVR = Não Analisado devido ao alto teor

Marcos Filipe Gonçalves Silva
CRQ II 02202046
Responsável Técnico

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br

Certificados ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 (ABS 32982 e ABS 39911)
Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ2314048

ANÁLISES	Hg	Ag	Al	As	S	Ba	Be	Bi	Cu
MÉTODO	CVA028	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148
UNIDADE	PPM	PPM	%	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	%
LIMITE DETECÇÃO	0,050	0,01	0,01	1	10	5	0,1	0,02	0,01
BRANCO_PREP	<0,05	<0,01	0,01	<1	<10	<5	<0,1	<0,02	<0,01
Blend	<0,05	0,05	1,57	2	<10	85	0,5	0,12	0,85
Latão	<0,05	0,04	1,35	3	<10	96	0,6	0,16	0,49
Micro Gabro	<0,05	0,07	2,27	<1	<10	87	0,3	<0,02	1,79
* STD OREAS262	0,194								
* REP Micro Gabro		0,07	2,13	<1	<10	70	0,3	<0,02	1,69
* STD SG_143		0,16	1,23	5	<10	126	0,7	0,11	0,25
* REP Micro Gabro	<0,05								
ANÁLISES	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Ga	Fe	Ga	Ge
MÉTODO	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148
UNIDADE	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	%	PPM	PPM
LIMITE DETECÇÃO	0,01	0,05	0,1	1	0,05	0,5	0,01	0,1	0,1
BRANCO_PREP	<0,01	0,36	0,3	5	<0,05	1,2	0,91	0,2	<0,1
Blend	0,04	53,91	13,2	4	0,87	156,9	4,91	6,9	<0,1
Latão	0,04	66,59	9,4	3	1,06	116,8	3,97	6,2	<0,1
Micro Gabro	0,08	23,33	21,3	6	0,37	242,6	6,84	8,7	<0,1
* REP Micro Gabro	0,07	23,03	21,1	5	0,36	245,8	6,82	8,4	<0,1
* STD SG_143	0,09	75,10	15,5	56	0,65	66,3	3,97	5,4	<0,1
ANÁLISES	Hf	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo
MÉTODO	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148
UNIDADE	PPM	PPM	%	PPM	PPM	PPM	%	PPM	PPM
LIMITE DETECÇÃO	0,05	0,02	0,01	0,1	1	0,01	0,01	5	0,05
BRANCO_PREP	0,10	<0,02	<0,01	0,2	<1	<0,01	<0,01	98	0,23
Blend	2,08	0,05	0,08	24,1	2	0,27	0,33	604	0,73
Latão	2,04	0,05	0,09	29,8	5	0,28	0,24	583	0,76
Micro Gabro	1,30	0,05	0,05	10,1	<1	0,25	0,56	668	0,52
* REP Micro Gabro	1,13	0,05	0,04	9,8	<1	0,23	0,54	660	0,51
* STD SG_143	0,23	0,03	0,13	33,5	5	0,07	0,28	911	0,83
ANÁLISES	Na	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Re	S	Sb
MÉTODO	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148	ICM148
UNIDADE	%	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	%	PPM
LIMITE DETECÇÃO	0,01	0,05	0,5	50	0,2	0,2	0,1	0,01	0,05
BRANCO_PREP	0,02	0,08	1,3	<50	0,8	0,4	<0,1	<0,01	0,08
Blend	0,18	1,51	7,2	1212	4,5	6,8	<0,1	0,08	0,22
Latão	0,07	1,51	2,8	1411	3,4	8,2	<0,1	<0,01	0,12
Micro Gabro	0,46	0,85	16,5	799	3,8	2,8	<0,1	0,26	0,23
* REP Micro Gabro	0,43	0,74	16,3	791	3,2	2,4	<0,1	0,26	0,19
* STD SG_143	0,01	0,53	46,0	216	11,1	14,4	<0,1	0,02	0,74

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br

Certificados ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ2314048

ANÁLISES	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti
MÉTODO UNIDADE LIMITE DETECÇÃO	ICM148 PPM 0,1	ICM148 PPM 1	ICM148 PPM 0,3	ICM148 PPM 0,5	ICM148 PPM 0,05	ICM148 PPM 0,02	ICM148 PPM 0,05	ICM148 PPM 0,1	ICM148 % 0,01
BRANCO_PREP	0,2	<1	<0,3	1,9	<0,05	<0,02	<0,05	1,6	<0,01
Blend	9,6	<1	2,3	38,4	<0,05	0,72	<0,05	8,7	0,44
Latão	9,5	<1	2,9	8,3	<0,05	0,80	<0,05	11,0	0,27
Micro Gabro	10,1	<1	1,1	104,6	<0,05	0,54	<0,05	2,1	0,80
* REP Micro Gabro	9,7	<1	1,0	101,5	<0,05	0,53	<0,05	1,9	0,79
* STD SG_143	3,1	<1	0,8	14,1	<0,05	0,28	<0,05	6,2	0,04

ANÁLISES	Ti	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr	SO2
MÉTODO UNIDADE LIMITE DETECÇÃO	ICM148 PPM 0,02	ICM148 PPM 0,05	ICM148 PPM 1	ICM148 PPM 0,1	ICM148 PPM 0,05	ICM148 PPM 0,1	ICM148 PPM 1	ICM148 PPM 0,5	XRF79C % 0,10
BRANCO_PREP	<0,02	<0,05	<1	<0,1	0,09	<0,1	1	<0,5	98,1
Blend	0,06	1,97	169	0,4	23,14	1,8	71	77,0	60,1
Latão	0,07	2,79	74	0,5	24,94	2,0	67	81,9	63,9
Micro Gabro	0,02	0,26	371	0,1	19,44	1,7	80	45,6	51,5
* REP Micro Gabro	0,02	0,25	371	0,1	19,03	1,6	80	42,5	
* STD SG_143	0,15	0,79	38	0,2	8,02	0,5	40	5,4	
* REP Micro Gabro									51,5
* STD SG_142									60,2

ANÁLISES	Al2O3	Fe2O3	CuO	MgO	TiO2	P2O5	H2O	K2O	MnO
MÉTODO UNIDADE LIMITE DETECÇÃO	XRF79C % 0,10	XRF79C % 0,01	XRF79C % 0,01	XRF79C % 0,10	XRF79C % 0,01	XRF79C % 0,01	XRF79C % 0,10	XRF79C % 0,01	XRF79C % 0,01
BRANCO_PREP	<0,1	1,16	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	<0,01	0,01
Blend	13,7	9,97	5,01	2,53	1,32	0,28	2,84	2,37	0,16
Latão	13,9	7,34	2,98	1,28	1,18	0,33	3,07	3,18	0,13
Micro Gabro	13,6	15,6	9,55	5,37	1,65	0,18	2,45	0,65	0,23
* REP Micro Gabro	13,5	15,8	9,63	5,43	1,66	0,18	2,45	0,65	0,24
* STD SG_142	11,5	13,5	3,42	1,83	0,92	0,37	0,67	2,31	0,29

ANÁLISES	SOMA	LDI
MÉTODO UNIDADE LIMITE DETECÇÃO	XRF79C % 40,00	PHY01E % -45,00
BRANCO_PREP	99,22	0,01
Blend	99,59	1,26
Latão	99,12	1,81
Micro Gabro	101,34	0,50
* REP BRANCO_PREP		N.A.
* STD SG_241		11,83
* REP Micro Gabro	101,60	
* STD SG_142	95,02	

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br

Certificados ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.

Anexo 2 - Petrografia Latito

		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA			
LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS					
Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br					
<u>CERTIFICADO DE ANÁLISE</u>					
Nº. 2022 136 Petro 03					
Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.					
Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem <i>AxioVision</i> .					
Solicitante: Revitasolos				Data de entrada: 15/06/2022	
				Data de emissão: 23/09/2022	
Amostra: Pedreira Jangada				Nº LAMIR: 136/22 03	
Características mesoscópicas	Tipo:	Rocha ígnea			
	Estado de alteração:	Rocha sã			
	Cor:	Castanha acinzentada			
	Granulação:	Muito fina			
	Granulometria:	Menor que 1,0			
	Estrutura:	Maciça			
	Textura:	Fanerítica equigranular fina			
Características microscópicas	Textura:	Fanerítica equigranular muito fina a vitrofírica			
	Estrutura:	Maciça			
	Estado de alteração:	Rocha sã			
	Latito com textura fanerítica equigranular muito fina a vitrofírica, hipocristalina com estrutura maciça. É composto por matriz cristalina e vidro vulcânico devitrificado. A matriz é formada por cristais de plagioclásio, feldspato alcalino, clinopiroxênio, quartzo e minerais opacos. O vidro vulcânico ocorre devitrificado, alterado para sílica microcristalina. Como minerais secundários ocorrem óxidos/hidróxidos de ferro como alteração de clinopiroxênio e minerais opacos e argilominerais como alteração de plagioclásio e feldspato alcalino, ambas incipientes e localizadas.				
Composição Mineral					
	Mineral	%			
Minerais primários	Plagioclásio (Anortita)	30%			
	Feldspato alcalino (Sanidina)	30%			
	Clinopiroxênio (Augita)	10%			
	Quartzo	Traços			
	Minerais opacos	Traços			
Minerais secundários	Óxidos/hidróxidos de ferro	Traços			
	Argilominerais	Traços			
Vidro vulcânico	Vidro vulcânico devitrificado, alterado para sílica microcristalina (quartzo)	30%			
Nome da rocha	Latito ¹				

PÁGINA 1 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:	Vice-diretora:
Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D	Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 03

Fotomicrografias



A



B

A – Amostra macroscópica descrita.

B – Lâmina delgada descrita.



C



D

C e D (aumento 1,0x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Trama geral da rocha, onde se observa estrutura maciça e textura fanerítica equigranular muito fina a vitrofírica. A rocha é configurada por matriz cristalina e vidro vulcânico devitrificado (Vd). A matriz é formada por cristais de plagioclásio, feldspato alcalino, clinopiroxênio, quartzo e minerais opacos (Op).

PÁGINA 2 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

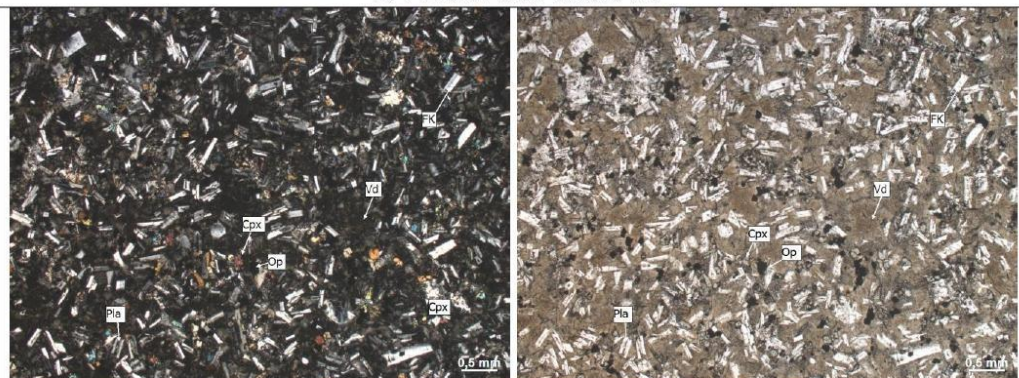


LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

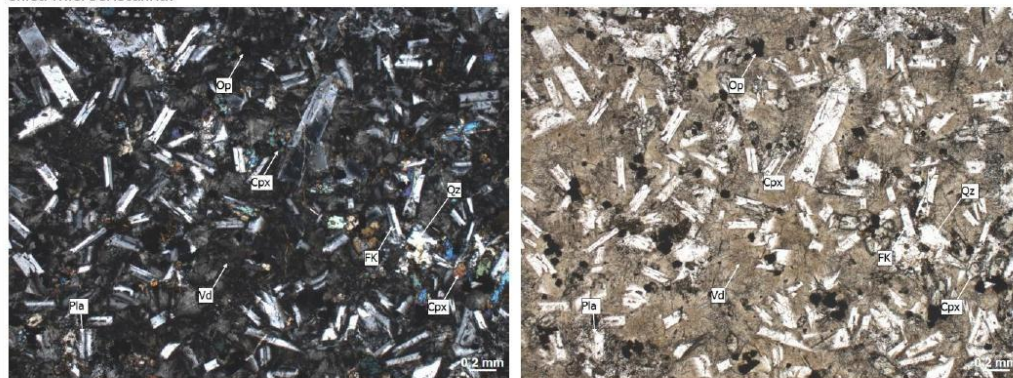
Nº. 2022 136 Petro 03



E

F

E e F (aumento 2,5x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Observam-se cristais de plagioclásio (Pla), feldspato alcalino (FK) clinopiroxênio (Cpx) e minerais opacos (Op). O vidro vulcânico ocorre devitrificado (Vd), alterado para sílica microcristalina.



G

H

G e H (aumento 5,0x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Observam-se cristais de plagioclásio (Pla), feldspato alcalino (FK) clinopiroxênio (Cpx), quartzo (Qz) e minerais opacos (Op). O vidro vulcânico ocorre devitrificado (Vd), alterado para sílica microcristalina.

PÁGINA 3 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

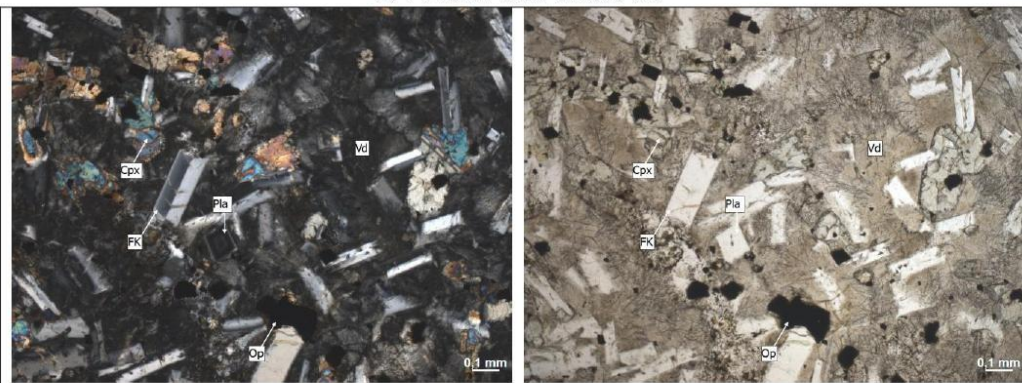


LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 03



I e J (aumento 10,0x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Detalhe da relação entre cristais da matriz e vidro vulcânico devitrificado (Vd). Na matriz, são observados cristais de plagioclásio (Pla), feldspato alcalino (FK) clinopiroxênio (Cpx) e minerais opacos (Op). O vidro vulcânico ocorre devitrificado (Vd), alterado para sílica microcristalina, onde são observadas quebras perlíticas.

Caracterização mineralógica

Minerais	%	Descrição	
Plagioclásio (Anortita)	30%	Granulometria:	
		Hábito:	
		Contatos:	
		Orientação preferencial:	
		Deformações intracristalinas:	
		Alteração:	
		Informações adicionais:	Parte dos cristais apresenta zoneamentos concêntricos
Feldspato alcalino (Sanidina)	30%	Granulometria:	0,03 a 0,5 mm
		Hábito:	Euédrico a subédrico
		Contatos:	Subretilíneos a retilíneos
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	Incipiente e localizada para argilominerais.
		Informações adicionais:	

PÁGINA 4 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 03

Clinopiroxênio (Augita)	10%	Granulometria:	0,05 a 0,8 mm
		Hábito:	Subédrico a anédrico
		Contatos:	Subretilíneos a irregulares
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	Incipiente e localizada para óxidos/hidróxidos de ferro.
		Informações adicionais:-	
Quartzo	Traços	Granulometria:	0,1 a 0,3 mm
		Hábito:	Anédrico
		Contatos:	Irregulares
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	-
		Informações adicionais:-	
Minerais opacos	Traços	Granulometria:	0,01 a 0,4 mm
		Hábito:	Anédrico a subédrico
		Contatos:	Irregulares
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	Incipiente e localizada para óxidos/hidróxidos de ferro.
		Informações adicionais:	
Vidro vulcânico devitrificado	30%	Granulometria:	-
		Hábito:	-
		Contatos:	-
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	Totalmente alterado para sílica microcristalina
		Informações adicionais: -	

OBSERVAÇÃO: A descrição petrográfica possui certo caráter subjetivo e interpretativo quanto à cor e à quantificação mineralógica. O resultado petrográfico apresentado restringe-se à amostra analisada.

¹ Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H. Wooley, A.R. *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms* Cambridge University Press, 2002. p.236.

- FINAL DO CERTIFICADO -

PÁGINA 5 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger

Anexo 3 - Petrografia Microgabro

		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA			
LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS					
Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br					
<u>CERTIFICADO DE ANÁLISE</u>					
Nº. 2022 136 Petro 02					
Análise solicitada: Caracterização petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual.					
Equipamento: Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo AXIO Imager.A2m. Sistema de captura e tratamento de imagem <i>AxiVision</i> .					
Solicitante: Revitasolos				Data de entrada: 15/06/2022	
				Data de emissão: 22/09/2022	
Amostra: Pedreira Luzia				Nº LAMIR: 136/22 02	
Características mesoscópicas	Tipo:	Rocha ígnea			
	Estado de alteração:	Rocha sã			
	Cor:	Cinza escura			
	Granulação:	Fina a muito fina			
	Granulometria:	Menor que 1,0 até 2,0 mm			
	Estrutura:	Maciça			
	Textura:	Fanerítica equigranular fina a muito fina			
Características microscópicas	Textura:	Fanerítica equigranular fina a muito fina, intergranular e intersertal			
	Estrutura:	Maciça			
	Estado de alteração:	Rocha sã			
	Microgabro/diabásio com textura fanerítica equigranular fina a muito fina, intergranular e intersertal, e estrutura maciça. É composto por matriz e vidro vulcânico devitrificado. A matriz é formada por cristais de plagioclásio, clinopiroxênio e minerais opacos. O vidro vulcânico ocorre devitrificado, alterado para argilominerais.				
Composição Mineral					
	Mineral	%			
Minerais primários	Plagioclásio (Labradorita)	45%			
	Clinopiroxênio (Augita)	45%			
	Minerais opacos	5%			
Minerais secundários		-			
Vidro vulcânico	Vidro vulcânico devitrificado, alterado para argilominerais	5%			
Nome da rocha	Microgabro/diabásio ¹				

PÁGINA 1 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:	Vice-diretora:
Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D	Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 02

Fotomicrografias



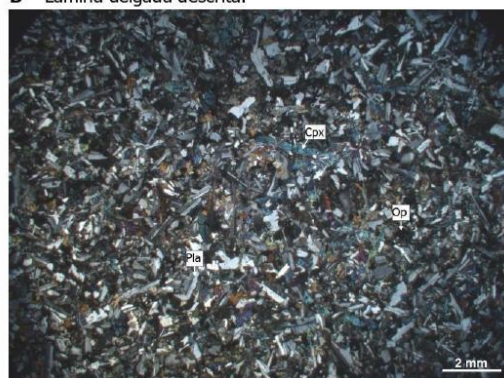
A



B

A – Amostra macroscópica descrita.

B – Lâmina delgada descrita.



C



D

C e D (aumento 1,0x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Trama geral da rocha, onde se observa estrutura maciça e textura fanerítica equigranular fina a muito fina, intergranular e intersertal. A rocha é configurada por matriz e vidro vulcânico devitrificado. A matriz é formada por cristais de plagioclásio (Pla), clinopiroxênio (Cpx) e minerais opacos (Op).

PÁGINA 2 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

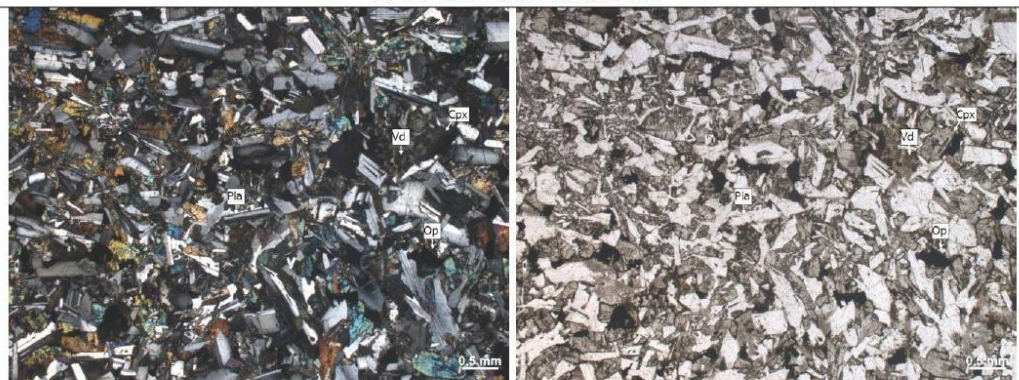


LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 02



E

F

E e F (aumento 2,5x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Observam-se cristais de plagioclásio (Pla), clinopiroxênio (Cpx) e minerais opacos (Op), além de vidro vulcânico devitrificado (Vd), alterado para argilominerais.



G

H

G e H (aumento 5,0x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Observam-se cristais de plagioclásio (Pla), clinopiroxênio (Cpx) e minerais opacos (Op), além de vidro vulcânico devitrificado (Vd), alterado para argilominerais.

PÁGINA 3 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

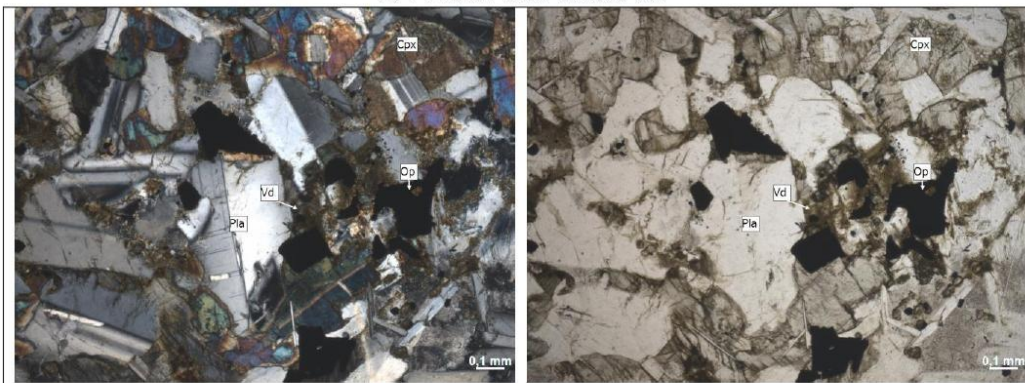


LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 02



I

J

I e J (aumento 10,0x/ luz polarizada e natural, respectivamente) – Relação entre cristais de matriz e vidro vulcânico devitrificado (Vd). Na matriz ocorrem cristais de plagioclásio (Pla), clinopiroxênio (Cpx) e minerais opacos.

Caracterização mineralógica

Minerais	%	Descrição	
Plagioclásio (Labradorita)	45%	Granulometria:	0,1 a 1,65 mm
		Hábito:	Euédrico a subédrico
		Contatos:	Subretilíneos
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	-
		Informações adicionais:-	
Clinopiroxênio (Augita)	45%	Granulometria:	0,1 a 2,5 mm
		Hábito:	Subédrico a anédrico
		Contatos:	Subretilíneos a irregulares
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	-
		Informações adicionais:-	

PÁGINA 4 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022 136 Petro 02

Minerais opacos	5%	Granulometria:	0,01 a 0,4 mm
		Hábito:	Anédrico a subédrico
		Contatos:	Irregulares
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	-
		Informações adicionais:	
Vidro vulcânico devitrificado	5%	Granulometria:	-
		Hábito:	-
		Contatos:	Intersticial
		Orientação preferencial:	-
		Deformações intracristalinas:	-
		Alteração:	Alterado para argilominerais
		Informações adicionais:	Argilominerais com coloração marrom acastanhada

OBSERVAÇÃO: A descrição petrográfica possui certo caráter subjetivo e interpretativo quanto à cor e à quantificação mineralógica. O resultado petrográfico apresentado restringe-se à amostra analisada.

¹ Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellien, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Wooley, A.R. *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms* Cambridge University Press, 2002. p.236.

- FINAL DO CERTIFICADO -

PÁGINA 5 de 5

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico:

Vice-diretora:

Guilherme Fedalto – Geólogo, Msc. – CREA PR-161049/D

Profª. Drª. Anelize M. B. Rumbelsperger

Anexo 4 - pH de abrasão do blend 70:30



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CAMPUS DE RIO PARANAÍBA

Campus Universitário - Caixa Postal 22 - Rio Paranaíba - MG - 38810-000

LASA – Lab. de Análises Químicas de Solos
Laudo s/n – 2022

SOLICITANTE: REVITASOLOS (Paula Freitas – PR)

AMOSTRA: Blend de rochas moídas (30 % quartzo-latito-basáltico e 70 % microgabro)

RESULTADO

pH de abrasão: 8.92

OBS: amostra enviada pelo solicitante. Descrição das amostras sob responsabilidade do solicitante.

Referência:

Grant, W.H. Abrasion pH, an index of chemical weathering. Clays and Clay Minerals, 17: 151-155, 1969.

André Mundstock Xavier de Carvalho
Eng. Agr. – D.Sc. Solos e Nutrição de Plantas
Professor Adjunto - UFV/CRP

André Mundstock X. de Carvalho
Mat. 10089-7
Professor UFV - CRP

LASA – Laboratório de Análises Químicas de Solos da UFV-CRP
Campus Universitário, s/n. C.P. 22 - Rio Paranaíba - MG. 38810-000
E-mail: andre.carvalho@ufv.br – (34) 3855 9532

Anexo 5- Granulometria



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022-0136GP

1. SOLICITANTE: Revitassolos

Endereço BR 476, Km 348 n.º1 – Bairro Colônia Luzia Paula Freitas –PR
CEP 84630-000

2. DATA DE EMISSÃO
21/09/2022

3. TIPO DE ENSAIO

Análise granulométrica geológica por peneiramento a úmido

Detalhes: Peneiras BERTEL entre as malhas *mesh* 5 e 325;

4. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)
Nº. LAMIR 136/22

5. RESULTADOS

	RESULTADOS DE ANÁLISE					
	GRANULOMÉTRICA GEOLÓGICA					
	POR PENEIRAMENTO					
Nº Lamir:	136/22		ID AMOSTRA			
Peneiramento:	Via úmida					
Equipamento:	Peneiras Bertel		malhas <i>mesh</i> 5 e 325			
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	%PESO	%ACUMULADA ACIMA	%ACUMULADA ABAIXO	
5	4.000	0.00	0.00	-	-	
9	2.000	9.39	4.61	4.61	95.39	
16	1.000	0.71	0.35	4.96	95.04	
32	0.500	14.30	7.02	11.98	88.02	
60	0.250	25.84	12.69	24.66	75.34	
115	0.125	65.11	31.97	56.63	43.37	
250	0.063	55.88	27.43	84.06	15.94	
325	0.044	23.80	11.68	95.75	4.25	
<325		8.66	4.25	100.00	0.00	
MASSA INICIAL (g):		203.69				

PÁGINA 1 de 2

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico: Daniel Cesar Antunes Paredes
Técnico do LabESed - UFPR

Coordenadora: Dr. Leonardo Fadel Cury
LAMIR - UFPR



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



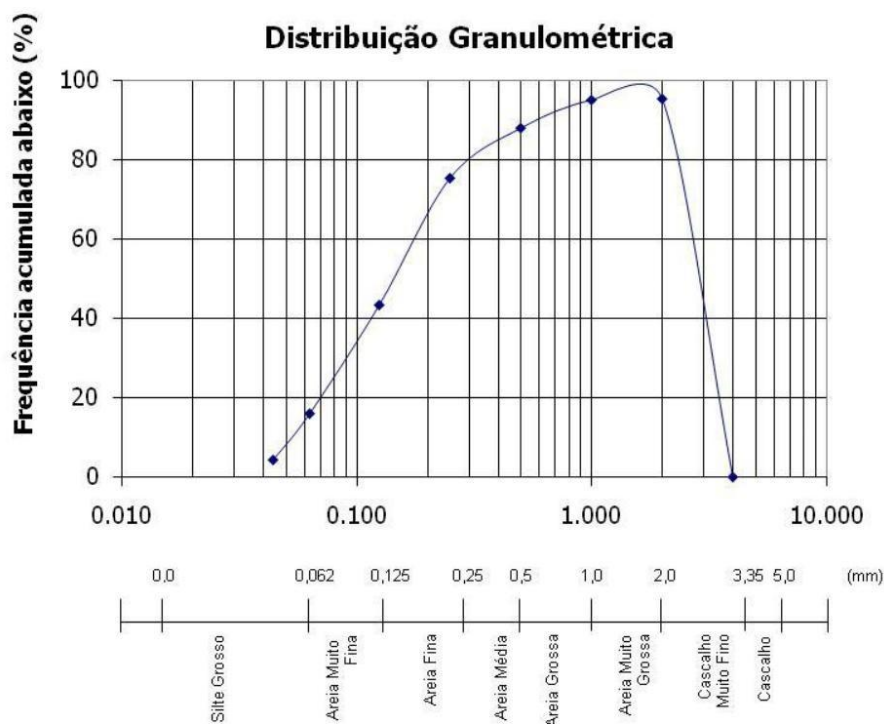
LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2022-0136GP

Gráfico da distribuição granulométrica acumulada:



- FINAL DO CERTIFICADO -

PÁGINA 2 de 2

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico: Daniel Cesar Antunes Paredes
Técnico do LabEsed - UFPR

Coordenadora: Dr. Leonardo Fadel Cury
LAMIR - UFPR