

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da
Água



Dissertação

**Minerais silicatados fonte de potássio na sucessão de trevo persa e arroz
irrigado no Sul do Rio Grande do Sul**

Verônica Lemos Vargas

Pelotas, 2025

Verônica Lemos Vargas

**Minerais silicatados fonte de potássio na sucessão de trevo persa e arroz
irrigado no Sul do Rio Grande do Sul**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientador: Dr. Filipe Selau Carlos

Co-Orientadora: Dr^a. Walkyria Bueno Scivittaro

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

V297m Vargas, Verônica Lemos

Minerais silicatados fonte de potássio na sucessão de trevo persa e arroz irrigado no sul do Rio Grande do Sul [recurso eletrônico] / Verônica Lemos Vargas ; Filipe Selau Carlos, orientador ; Walkyria Bueno Scivittaro, coorientadora. — Pelotas, 2025.
60 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Nutrição de plantas. 2. Plantas de cobertura. 3. Agrominerais. 4. Sustentabilidade agrícola. 5. Remineralizadores. I. Carlos, Filipe Selau, orient. II. Scivittaro, Walkyria Bueno, coorient. III. Título.

CDD 631.83

Verônica Lemos Vargas

Minerais silicatados fonte de potássio na sucessão de trevo persa e arroz
irrigado no Sul do Rio Grande do Sul

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre
Em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo
e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de
Pelotas.

Data da defesa: 30 de março de 2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Filipe Selau Carlos (Orientador)

Doutor em ciência do solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Rogério Oliveira, de Sousa

Doutor em ciência do solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Sidnei Deuner

Doutor em agronomia (fisiologia vegetal) pela Universidade Federal de Lavras

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por sempre estar comigo, me guiando na minha jornada na terra.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais Ricardo Duval Vargas e Cleia Lemos Vargas, que trabalhando dia após dias embaixo de sol e chuva me fizeram chegar até aqui na sombra. As minhas irmãs Mônica, Arlete e Marlete, que sempre se fizeram presentes em todos os momentos e incentivando a seguir a caminhada dos estudos.

Ao professor Filipe Selau Carlos, pela orientação, dedicação, amizade, oportunidades, ensinamentos e companheirismo, e sem dúvidas um exemplo profissional.

Ao Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, professores, estagiários, colegas e funcionários pela disponibilidade, receptividade, companheirismo e aprendizado.

Ao grupo de estudos FertSoil, por ser minha segunda família, e por toda ajuda e apoio.

Aos meus amigos que tiveram sempre comigo ao longo dessa jornada, onde sou grata por cada um deles, que não mediram esforços para apoiar e ajudar.

AO CNPq processo 407900/2022-5 pelo fomento da pesquisa.

À CAPES pela bolsa de estudo.

Aos demais que não foram citados, mas que sabem a importância que tiveram na construção desta jornada, meu muito obrigada!!!

*“Às estrelas que ouvem e aos sonhos que são
atendidos”*

- Sarah J. Maas

Resumo

VARGAS, Verônica Lemos. **Minerais silicatados fonte de potássio na sucessão de trevo persa e arroz irrigado no Sul do Rio Grande do Sul.**

Orientador: Filipe Selau Carlos. 2024. 60f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil, 2025.

O Brasil enfrenta uma crescente dependência de fertilizantes minerais importados, o que representa desafios significativos para a soberania alimentar e a sustentabilidade da agricultura nacional. Este trabalho tem como objetivo geral avaliar as frações disponíveis e totais de potássio no solo, o teor de potássio acumulado nos grãos, a produtividade de arroz irrigado e a eficiência agronômica das fontes de potássio em sistema de sucessão de trevo persa e arroz irrigado em 4 locais de produção em terras baixas do Rio Grande do Sul. A pesquisa foi conduzida em quatro localidades: Palma (Capão do Leão-RS), AUD - estação experimental (Camaquã-RS), Capão Grande (Camaquã-RS) e Granjas 4 Irmãos (Rio Grande-RS). As fontes de minerais silicatados usados foram fonolito, sienito, nefelina sienito, mica xisto e o fertilizante convencional cloreto de potássio (KCl). Os resultados demonstraram que os agrominerais apresentam liberação gradual de nutrientes, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo e minimizando perdas por lixiviação. A eficiência agronômica variou entre os locais e as fontes de potássio avaliadas, sendo que minerais como mica xisto e nefelina sienito mostraram desempenho promissor. Além disso, foi observada uma influência positiva na produtividade de grãos de arroz irrigado, reforçando a relevância dos agrominerais como alternativas viáveis ao uso de fertilizantes minerais convencionais.

Palavras-chave: Nutrição de plantas; Plantas de cobertura; Agrominerais, sustentabilidade agrícola; Remineralizadores.

Abstract

VARGAS, Verônica Lemos. **Silicate minerals as a source of potassium in the succession of Persian clover and irrigated rice in southern Rio Grande do Sul**. Advisor: Filipe Selau Carlos. 2024. 60 pages. Dissertation (master's in science) – Graduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil, 2024.

Brazil faces a growing dependence on imported mineral fertilizers, posing significant challenges to food sovereignty and the sustainability of national agriculture. This study aims to evaluate the available and total potassium fractions in the soil, the potassium content accumulated in the grains, the productivity of irrigated rice, and the agronomic efficiency of potassium sources in a cropping system involving Persian clover and irrigated rice in four lowland production areas in Rio Grande do Sul. The research was conducted in four locations: Palma (Capão do Leão-RS), AUD experimental station (Camaquã-RS), Capão Grande (Camaquã-RS), and Granjas 4 Irmãos (Rio Grande-RS). The silicate mineral sources used were phonolite, syenite, nepheline syenite, mica schist, and the conventional fertilizer potassium chloride (KCl). The results demonstrated that agrominerals exhibit gradual nutrient release, contributing to improved soil fertility and minimizing nutrient losses due to leaching. The agronomic efficiency varied between locations and potassium sources, with minerals such as mica schist and nepheline syenite showing promising performance. Furthermore, a positive influence on the productivity of irrigated rice grains was observed, reinforcing the relevance of agrominerals as viable alternatives to conventional mineral fertilizers.

Keywords: Plant nutrition; Irrigated rice; Agrominerals; Agricultural sustainability; Remineralizers.

Lista de Figuras

Figura 1- Mapa de localização dos experimentos com fontes de minerais silicatados fontes de potássio.....	29
Figura 2 - Características químicas dos solos antes do início dos experimentos, ano agrícola 2023.....	30
Figura 3 - Teor potássio total no solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1:sem adubação potássica; T2:cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p<0,05$), ns (não significativo).....	35
Figura 4 - Teor potássio disponível (Mehlich I) no solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2:cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p<0,05$), ns (não significativo).	36
Figura 5 - Teor potássio trocável no solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2:cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p<0,05$), ns (não significativo).	37
Figura 6 - Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de fonolito usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas	38
Figura 7- Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de mica usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas	38
Figura 8 - Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de sienito usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas	39
Figura 9 - Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de nefelina sienito usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas.....	39
Figura 10 - Teor de nitrogênio na parte aérea das plantas de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2:cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p<0,05$), ns (não significativo)	40
Figura 11- Índice de clorofila total das plantas de arroz irrigado sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2:cloreto de	

potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo).....	41
Figura 12 - Teor de potássio total na folha bandeira das plantas de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)	42
Figura 13 - Teor de potássio acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo).....	43
Figura 14 - Estatura das plantas de arroz irrigado sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: controle sem adubação potássica; T2: adubação potássica convencional com KCl; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo).....	44
Figura 15 - Produtividade de grãos de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo).....	45
Figura 16 - Teor de potássio total nos grãos de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo).....	46

Lista de Tabelas

Tabela 1- Tratamentos com diferentes agrominerais usados em experimento com a cultura do arroz irrigado.....	30
Tabela 2- Eficiência agronômica dos minerais silicatados utilizados como fontes alternativas de potássio em terras baixas	47

Lista de Abreviaturas e Siglas

CTC	Troca Catiônica
FC	Fator Capacidade ou Poder Tampão
FRX	Fluorescência de raio-X por energia dispersiva
I	Fator Intensidade
KMB	Bactérias Mobilizadoras de Potássio (<i>Potassium-Mobilizing Bacteria</i>)
MOS	Matéria Orgânica do Solo
PNM	Plano Nacional de Mineração
Q	Fator Quantidade
RS	Estado do Rio Grande do Sul

Sumário

1 Introdução	14
1.1 Hipóteses	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 Revisão Bibliográfica	18
2.1 Dissolução mineral e liberação de nutrientes	19
2.2 Cinética de dissolução mineral	21
2.3 Disponibilidade e dinâmica de nutrientes no solo	23
2.4 Agrominerais silicáticos – pesquisas e rotas tecnológicas	26
3 Material e Métodos	29
3.2 Análise de atributos químicos do solo	31
3.3 Difração de Raio-X (DRX) – Composição mineralógica da amostra	32
3.4 Composição de nutrientes na biomassa das plantas	33
3.5 Índice de clorofila total	33
3.6 Produtividade de grãos	33
3.7 Índice de eficiência agronômica de uso do potássio (IEA%)	33
3.8 Análises estatísticas	34
4 Resultados	35
5 Discussão	49
6 Conclusão	54
Referências	55

1 Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores de grãos do mundo, com uma área cultivada que deve chegar a 100 milhões de hectares até 2030. Esse cenário é resultado de diversos fatores, como a disponibilidade de terras, o clima favorável, a mão de obra qualificada e o desenvolvimento de tecnologias para a agricultura tropical. No entanto, o aumento da produção agrícola também implica em um maior consumo de recursos naturais, especialmente os nutrientes do solo.

Para manter ou elevar a produtividade das culturas, é necessário aplicar fertilizantes minerais que corrigem a fertilidade do solo, principalmente em solos subtropicais como os da região Sul do Brasil. Contudo, o uso de fertilizantes minerais apresenta desafios e limitações. O custo desses insumos é elevado e representa uma parcela significativa dos gastos dos produtores. Além disso, o Brasil depende fortemente da importação de fertilizantes, essa situação torna o país vulnerável às variações cambiais e às instabilidades nos países fornecedores, podendo comprometer o abastecimento do país.

Outro aspecto relevante é o impacto ambiental causado pelo uso excessivo de fertilizantes químicos, que pode gerar poluição das águas, emissão de gases de efeito estufa e perda de biodiversidade. Diante desse contexto, torna-se urgente e necessário buscar alternativas que possam reduzir a dependência externa de fertilizantes e minimizar os seus efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Uma das alternativas possíveis é o uso dos agrominerais ou remineralizadores, que são materiais provenientes de resíduos de mineração que contêm nutrientes para as plantas. Esses materiais podem ser utilizados como fontes complementares ou substitutas de fertilizantes minerais, desde que atendam aos requisitos estabelecidos pela legislação específica.

O Brasil é o maior importador mundial de fertilizantes, importa aproximadamente 85% de sua demanda. Essa alta dependência externa de matéria-prima ou de fertilizantes industrializados afeta negativamente a soberania alimentar e a capacidade de produção de alimentos do país. É fundamental, portanto, buscar fertilizantes alternativos de custo reduzido e com disponibilidade local, mas que também apresentem eficiência agronômica.

Neste contexto, os agrominerais surgem como uma possibilidade para fornecer gradualmente os nutrientes necessários ao solo, permitindo condições adequadas de nutrição para as culturas agrícolas em médio prazo. O uso dos agrominerais ainda é pouco comum em sistemas de produção em larga escala, como os sistemas de produção de grãos e agropecuária integrada. Além disso, há uma escassez de informações sobre as principais fontes de agrominerais na região Sul do Brasil, especialmente em terras baixas.

Nos últimos anos, no entanto, essa área de pesquisa tem recebido maior destaque. Portanto, é imprescindível realizar pesquisas de médio prazo para obter informações sólidas que subsidiem a recomendação de agrominerais para os sistemas de terras baixas no Sul do País. Além disso, a produtividade das culturas requer maior utilização de recursos naturais, como o uso de nutrientes do solo. Por isso, houve um aumento do consumo de fertilizantes minerais para recuperar a fertilidade do solo, principalmente em solos subtropicais como no Sul do Brasil. Infelizmente, o Brasil é altamente dependente do mercado externo de fertilizantes, sendo o maior importador do mundo.

Uma estratégia para reduzir a dependência externa de fertilizantes na agricultura brasileira é o uso de agrominerais ou remineralizadores, que são obtidos a partir de resíduos de mineração. Esses materiais devem atender a requisitos químicos e físicos estabelecidos por legislação específica, como a presença de determinados elementos e a ausência de substâncias tóxicas. Além disso, sua eficiência agrônômica deve ser comprovada por uma empresa de pesquisa credenciada pelo MAPA. A viabilidade econômica desses materiais está relacionada ao uso regional, pois eles são utilizados em grandes quantidades e o transporte pode ser um fator limitante.

Em suma, a dependência do Brasil em fertilizantes importados é uma questão crítica que afeta a soberania alimentar e a produção agrícola. A busca por alternativas viáveis, como os agrominerais, é essencial para garantir a sustentabilidade e a eficiência da agricultura brasileira. Embora o uso de agrominerais ainda seja limitado e haja uma falta de informações sobre suas fontes na região Sul, a crescente atenção a essa área de pesquisa indica um futuro promissor. É crucial continuar a pesquisa e o desenvolvimento para explorar plenamente o potencial dos agrominerais, especialmente em solos subtropicais como os encontrados no Sul do Brasil. Ao fazer isso, podemos

esperar reduzir a dependência de fertilizantes importados, melhorar a saúde do solo e, finalmente, fortalecer a capacidade do Brasil de produzir alimentos de maneira sustentável e autônoma. A viabilidade dessas alternativas dependerá de sua eficácia agronômica, conformidade com as normas regulatórias e considerações econômicas, como os custos de transporte. Portanto, é imperativo que continuemos a investir em pesquisa e inovação nesta área e em especial em ambientes de terras baixas sob cultivo de arroz onde há o alagamento e suas condições redox que podem alterar as taxas de liberação de potássio e ter maior absorção pela cultura.

1.1 Hipóteses

As condições específicas de terras baixas, incluindo o alagamento, podem contribuir para maior disponibilização do potássio de minerais silicatados e ser uma alternativa de nutrição potássica.

A liberação gradual do potássio de minerais silicatados tem uma contribuição positiva em relação ao cloreto de potássio de alta solubilidade e mais propenso a perdas, especialmente em solos de terras baixas onde há perdas significativas do elemento por escoamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as frações disponíveis e total de potássio no solo, teor de potássio no grão, produtividade de grãos de arroz irrigado e eficiência agronômica de uso de potássio em quatro locais de sistemas de produção em terras baixas do Rio Grande do Sul.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Quantificar as frações disponíveis de potássio no solo em diferentes locais de sistemas de produção em terras baixas;

- Determinar o teor de potássio acumulado nos grãos de arroz irrigado cultivado nessas áreas;
- Avaliar a produtividade de grãos de arroz irrigado em função da disponibilidade de potássio no solo;
- Estimar a eficiência agronômica do uso de potássio em diferentes sistemas de manejo agrícola nas terras baixas do Rio Grande do Sul.

2 Revisão Bibliográfica

O Brasil tem ampliado a área de cultivo de grãos para atender à demanda mundial de alimentos (MAPA, 2022). No entanto, essa expansão requer o uso de fertilizantes minerais, que têm sofrido grandes aumentos de preço no mercado internacional e o País é altamente dependente da importação destes produtos (MAPA, 2022). Para contornar essa dependência, a exploração de tecnologias alternativas nacionais, como os agrominerais, é essencial. Estes materiais devem atender às exigências químicas e físicas da legislação vigente e possuir eficiência agronômica comprovada por trabalhos científicos.

O aumento da produtividade das culturas depende, entre outros fatores, do uso dos nutrientes do solo (Carlos *et al.*, 2021). Sendo assim, cresce a demanda de fertilizantes minerais para restaurar a fertilidade do solo visando o aumento da produtividade das culturas, especialmente em solos sob condições subtropicais como no Sul do Brasil (Anghinoni *et al.*, 2013).

Uma das estratégias para reduzir a dependência externa de fertilizantes, é o aproveitamento dos remineralizadores de solo, chamados também agrominerais, sendo obtidos de resíduos de atividades de mineração. Entretanto, estes materiais devem atender às garantias determinadas em legislação específica (Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016), como apresentar soma de bases (CaO , MgO , K_2O) igual ou superior a 9%, teor de óxido de potássio (K_2O) superior a 1%, não possuir elementos potencialmente tóxicos acima dos níveis indicados, e principalmente, apresentar eficiência agronômica (MAPA, 2022). Além disso, a possibilidade de sucesso econômico está relacionada com o uso em toda a região, já que são utilizados em quantidades maiores do que os fertilizantes solúveis, o que significa que o custo do transporte pode ser um fator que restringe a viabilidade.

No Estado do Rio Grande do Sul (RS) há um número significativo de minas distribuídas pelo território para diversos fins, com destaque para a produção de carvão, pedras ornamentais e preciosas, e produtos destinados à construção civil. Os resíduos oriundos destas minas, em pó, poderiam ser usados como remineralizadores de solo. Porém os nutrientes existentes nesses resíduos são geralmente insolúveis em água, limitando o aproveitamento dos

nutrientes pelas plantas. A liberação dos nutrientes dependerá do intemperismo dos silicatos, que se trata de um processo de natureza lenta (Peres, 2019).

Rochas que contêm os minerais feldspato, muscovita, glauconita, flogopita, biotita, feldspatóides e zeolitas têm a capacidade de liberar potássio (K) durante o processo de intemperismo. Portanto, esses minerais podem ser utilizados como fontes de K no solo. Além disso, durante o processo de liberação de K, a flogopita e a biotita também podem liberar magnésio e ferro. A intemperização dos minerais primários da rocha também pode resultar na formação de novos minerais com cargas elétricas superficiais, o que pode aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (Peres, 2019).

De acordo com Boeni *et al.* (2010), os solos de terras baixas no RS são conhecidos pela sua baixa fertilidade natural. Estes solos são compostos principalmente por sedimentos de argilitos e siltitos, como mencionado por Streck *et al.* (2008), que apresentam baixos teores de carbono orgânico (Carlos *et al.*, 2021) e K (Boeni *et al.*, 2010). Como resultado, é necessário aplicar altas doses de adubos para corrigir esses solos e atingir níveis adequados de produtividade (Marques Neto *et al.*, 2023).

São escassas pesquisas que explorem o uso de agrominerais em áreas de terras baixas. Esses tipos de ambientes possuem naturalmente baixa fertilidade e práticas de cultivo inundado, o que alteram significativamente as condições de oxirredução do solo e afeta a dinâmica da liberação de nutrientes (Sousa *et al.*, 2002).

Portanto, é de extrema importância realizar estudos de pesquisa de médio e longo prazo para avaliar a utilização de agrominerais e a liberação de nutrientes no solo, bem como sua influência na CTC, na nutrição e na produtividade de culturas em sistemas de produção de terras baixas. Esses sistemas incluem não apenas culturas de grãos como arroz, soja e milho, mas também o uso de pastagens em sistemas integrados de produção agropecuária (Carlos *et al.*, 2020).

2.1 Dissolução mineral e liberação de nutrientes

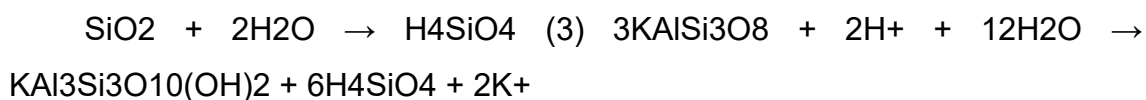
O intemperismo é um processo que envolve uma série de mudanças que as rochas passam quando expostas a altas concentrações de oxigênio, dióxido

de carbono e água (O₂, CO₂ e H₂O) na superfície do planeta. No intemperismo químico, os minerais primários são dissolvidos através de reações químicas, resultando na formação de novos minerais que são mais estáveis e em equilíbrio com as condições ambientais (Loughnan, 1969).

As mudanças resultantes do intemperismo químico dependem da natureza da rocha, das características dos reagentes e das condições que controlam o equilíbrio das reações químicas (Kampf *et al.*, 2009). O intemperismo químico é o produto da interação de vários processos - hidratação, solução, hidrólise, oxidação-redução e complexação, tornando difícil determinar quando um processo começa e termina (Nahon, 1991).

Em relação à dinâmica dos silicatos, identifica-se a hidrólise como a reação de dissolução mais importante desses minerais. Segundo Casey e Bunker (1990), em condições ácidas, o O₂ se torna protonado ao se ligar ao íon H⁺, formando hidroxilas que enfraquecem as ligações oxigênio-metal na estrutura mineral. Isso resulta na liberação dos íons alcalinos (K⁺ e Na⁺), alcalino-terrosos (Ca²⁺ e Mg²⁺), além de Si na fase líquida.

Stumm e Morgan (1996) apontam que as reações de dissolução de minerais podem ser classificadas em congruentes e incongruentes. A dissolução congruente é caracterizada pela dissolução completa do mineral, sem resultar na formação de novas fases minerais, como ocorre na dissolução do quartzo. A dissolução incongruente consiste essencialmente em uma troca de ligantes da rede cristalina, resultando na formação de novas fases minerais e substâncias em solução, como na alteração de feldspato em muscovita.



É evidente que o intemperismo químico é controlado principalmente pela presença de água, seja como agente físico, solvente ou meio de transporte (Nahon, 1991). Toledo *et al.* (2008) afirmam que enquanto as condições de renovação das soluções reagentes forem mantidas, as reações poderão progredir, sendo necessário para isso que ocorra a eliminação dos componentes solúveis do sistema. O grau de eliminação dos elementos/substâncias

dissolvidos pode determinar a intensidade da hidrólise e, conseqüentemente, a intensidade da dissolução mineral.

2.2 Cinética de dissolução mineral

A cinética química é o estudo das velocidades das reações químicas e é influenciada por vários fatores, como a concentração das substâncias, a temperatura e a presença de catalisadores (Drever, 1988).

A cinética de dissolução da maioria dos minerais em ambientes naturais é controlada por reações heterogêneas que ocorrem na interface mineral-solução. De acordo com Casey e Bunker (1990), essas reações ocorrem simultaneamente, mas os locais na estrutura de um mineral reagem de maneira diferente durante o processo de intemperismo. Assim, as reações de dissolução afetam e são afetadas pela composição química e pela estrutura da superfície mineral.

Há muito tempo se entende e tem sido demonstrado que a dissolução da maioria dos óxidos e minerais silicáticos em baixas temperaturas é controlada por fenômenos de superfície (Berner, 1978; Holdren e Berner, 1979; Stumm, 1987), preferencialmente em locais de alta energia livre associados a deslocamentos ou microfraturas em planos e fraquezas, ou deformações nos cristais.

Kalinowski (1997) demonstrou que, à medida que a dissolução avança, ocorre uma redução da energia livre no sistema. Um mineral pode dissolver-se uniformemente, reagir seletivamente em regiões com mais energia livre de superfície, ou formar uma camada alterada na interface solução-sólido.

Portanto, a maioria das reações de dissolução de silicatos depende de interações entre íons na superfície do mineral. Essas interações de superfície envolvem grupos oxihidróxidos com H^+ e OH^- (superfície de protonação) e ligantes como ânions e ácidos fracos que promovem as reações de dissolução.

Berner (1978) descreve três mecanismos no processo de dissolução dos minerais: transporte de soluto do cristal dissolvido; desprendimento de íons ou moléculas da superfície do cristal (incluindo desorção, difusão na superfície etc.); combinação simultânea dos dois processos anteriores. A dissolução pode ser mais determinada pelo transporte, onde os íons são liberados da superfície do

cristal para a solução muito rapidamente, formando uma solução saturada ao redor da superfície. A dissolução então ocorre à medida que esses íons difundem para regiões mais distantes do cristal com menor concentração de solutos. Alternativamente, a dissolução pode ser mais determinada pela extensão de superfície sujeita a fenômenos de interação iônica, onde o desprendimento dos íons da superfície do cristal é tão lento que não acompanha a difusão. À medida que a dissolução supera a difusão, a concentração da solução próxima à superfície é a mesma que ao redor da solução, diminuindo assim a taxa de dissolução.

A cinética química, que é o estudo das velocidades das reações químicas, é influenciada por vários fatores, incluindo a concentração das substâncias, a temperatura e a presença de catalisadores (Drever, 1988).

A cinética de dissolução da maioria dos minerais em ambientes naturais é controlada por reações heterogêneas que ocorrem na interface mineral-solução. Essas reações ocorrem simultaneamente, mas os locais na estrutura de um mineral reagem de maneira diferente durante o processo de intemperismo. Assim, as reações de dissolução afetam e são afetadas pela composição química e pela estrutura da superfície mineral (Casey e Bunker 1990).

A dissolução da maioria dos óxidos e minerais silicáticos em baixas temperaturas é controlada por fenômenos de superfície, preferencialmente em locais de alta energia livre associados a deslocamentos ou microfraturas em planos e fraquezas, ou deformações nos cristais (Berner, 1978; Holdren e Berner, 1979; Stumm, 1987).

À medida que a dissolução avança, ocorre uma redução da energia livre no sistema. Um mineral pode dissolver-se uniformemente, reagir seletivamente em regiões com mais energia livre de superfície, ou formar uma camada alterada na interface solução-sólido (Kalinowski, 1997).

A maioria das reações de dissolução de silicatos depende de interações entre íons na superfície do mineral. Essas interações de superfície envolvem grupos oxihidróxidos com H^+ e OH^- (superfície de protonação) e ligantes como ânions e ácidos fracos que promovem as reações de dissolução (Amrhein e Suarez, 1992; Biber et al., 1994).

Existem três mecanismos no processo de dissolução dos minerais: transporte de soluto do cristal dissolvido; desprendimento de íons ou moléculas da superfície do cristal (incluindo desorção, difusão na superfície etc.); combinação simultânea dos dois processos anteriores (Berner, 1978). A resistência dos minerais tem sido estudada através de experimentos que possibilitam o controle de parâmetros que afetam a cinética de dissolução mineral.

O pH é um fator relevante que afeta a taxa de dissolução de uma espécie mineral. A dissolução tende a ser lenta em condições de pH neutro, e rápidas em bases e ácidos fortes. A influência do pH na taxa de dissolução é fraca na faixa de 4 a 8, principalmente para aluminossilicatos, indicando baixa solubilidade destes minerais (Casey e Bunker, 1990; Drever, 1994).

O aumento da temperatura é um fator que pode aumentar significativamente a taxa de dissolução mineral. Os efeitos da temperatura sobre os silicatos são bem conhecidos experimentalmente. Segundo White *et al.* (1999), um aumento da temperatura de 0 a 25°C resultou em um aumento da taxa de dissolução em uma ordem de magnitude, sugerindo que as variações climáticas (5-35°C) têm efeitos significativos no intemperismo químico dos minerais de silicato.

No entanto, além desses fatores, a dissolução dos minerais depende consideravelmente da área de superfície reativa em contato com a água (Berner, 1978). A superfície reativa do mineral é determinada por sua composição química, estrutura iônica e microtopografia. O tamanho das partículas também pode afetar a estabilidade dos minerais.

Portanto, a quantificação da relação entre a estrutura mineral e a taxa de dissolução é difícil de determinar (Casey e Bunker, 1990). Como os minerais são encontrados na natureza de forma impura, é impossível generalizar uma série de estruturas para os estudos de dissolução mineral, tornando difícil comparar os resultados de diferentes experimentos.

2.3 Disponibilidade e dinâmica de nutrientes no solo

O crescimento e o desenvolvimento das plantas são influenciados por fatores do solo de natureza física, mineralógica, química e biológica. A

disponibilidade envolve processos e reações que liberam elementos na solução e são absorvidos pelas plantas, e envolve a capacidade do solo em fornecer nutrientes e a capacidade da planta em absorvê-los e utilizá-los eficientemente.

Entre os fatores químicos que podem influenciar a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas, destacam-se a composição mineralógica, o teor e a forma do elemento nutricional, a reação do solo (pH), o teor de matéria orgânica e a presença de elementos potencialmente tóxicos (Meurer *et al.*, 2008).

O tipo e os teores de elementos minerais no solo são resultantes da intemperização do material de origem, de modo que a composição mineralógica determina a maior ou menor disponibilidade de elementos essenciais para as plantas. Assim, minerais primários como feldspato, micas e anfibólios, e minerais secundários, como vermiculita, esmectita, caulinita e óxidos de Fe e Al, têm importância significativa no crescimento das plantas (Meurer *et al.*, 2008).

Os minerais da fração argila do solo (colóides) apresentam cargas positivas e negativas de superfície, que conferem ao solo capacidade de reter os íons na fase sólida, com efeitos sobre a maior ou menor disponibilidade para as plantas. Os solos de terras baixas possuem características distintas que os diferenciam de outros tipos de solos. Eles são formados, em grande parte, por sedimentos acumulados em áreas de inundação, o que resulta em uma textura densa, baixa porosidade e camadas compactadas. Geralmente, apresentam um horizonte A pouco profundo e um horizonte B quase impermeável. A drenagem natural desses solos é deficiente, dificultando o manejo agrícola e a produtividade em condições não adaptadas (EMBRAPA, 2020).

Em termos de fertilidade, os solos de terras baixas tendem a apresentar teores médios ou baixos de nutrientes devido à limitada presença de matéria orgânica. O alagamento frequente dessas áreas expulsa o oxigênio do solo, favorecendo microrganismos anaeróbicos, o que altera significativamente a disponibilidade de nutrientes. Elementos como nitrogênio, ferro e manganês sofrem transformações devido a essas condições, enquanto a disponibilidade de fósforo pode aumentar como resultado da redução do ferro. Por outro lado, o enxofre tende a ser convertido em formas menos acessíveis às plantas (EMBRAPA, 2013).

Essas características tornam os solos de terras baixas desafiadores para práticas agrícolas convencionais. Entretanto, quando manejados corretamente, esses solos podem oferecer oportunidades para práticas agrícolas adaptadas, que aproveitam as características únicas do ambiente para promover a produtividade de culturas específicas.

As reservas de nutrientes do solo, especialmente de K, Ca e Mg, encontram-se nas formas estrutural, não-trocável, trocável e na solução do solo. Para Mengel e Kirkby (1987), essas formas estão em equilíbrio dinâmico, pois quando o teor na solução do solo diminui, por absorção pelas plantas ou por lixiviação, ocorre reposição da fase sólida (trocável e não-trocável) para a solução do solo. Portanto, quanto maior a depleção nos teores disponível para as plantas, maior a intensidade da liberação das reservas para restabelecer os equilíbrios.

Os autores supõem que como todas as formas estão ligadas a este equilíbrio, todas podem ser liberadas, entretanto, reconhecem que a taxa de liberação dos elementos depende do tipo de reação envolvida e da composição mineralógica do solo. A maioria dos nutrientes K, Ca e Mg do solo estão presentes nas formas estruturais e não-trocáveis. Vários estudos indicam que o fornecimento desses nutrientes para as plantas não é feito exclusivamente pela forma trocável (Mengel e Kirkby, 1987).

Segundo Mello e Novais (2007), além da quantidade de nutrientes em solução e da reserva desses na fase sólida, é igualmente importante conhecer o poder de reposição da fase sólida para a solução do solo. Eles afirmam que a disponibilidade de nutrientes no solo é determinada por esses componentes, que são denominados: (Q) fator quantidade, que representa a reserva do íon trocável na fase sólida; (I) fator intensidade, que é a concentração do íon na solução do solo; (FC) fator capacidade ou poder tampão, que compreende a relação $\Delta Q/\Delta I$. Portanto, quanto maior o FC, menor a concentração do íon em solução (I), e mais tamponado é o solo.

Os teores de K, Ca e Mg nos solos vêm do material de origem, mas cada elemento tem suas peculiaridades. Destaca-se que a dinâmica de Ca e Mg em solução é menos complexa que a do K, e que o Ca está mais fortemente retido no complexo de troca do que o Mg, observando a série liotrópica ($Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ = NH_4^+ > Na^+$), sendo o cátion predominante na CTC dos solos.

Isso explica a maior lixiviação de K em solos bem drenados, principalmente em solos de baixa CTC.

Lopes (1984) afirma que os teores extremamente baixos de Ca e Mg, e a reduzida contribuição de K para o complexo de troca catiônica, tornam os valores relativos de Al trocável e das bases trocáveis as mais importantes limitações de uso dos solos de Cerrado. Destaca-se que os efeitos da acidez na disponibilidade dos nutrientes no solo são marcantes: a intemperização química dos minerais tende a diminuir em $\text{pH} > 5$; a formação de novos minerais é maior na faixa de pH entre 5,0 e 7,5; e a atividade do Al em solução é maior quando o $\text{pH} < 5,0$.

Em condições de elevada acidez, a solubilidade dos minerais aumenta a concentração de determinados elementos em solução, podendo tornar-se tóxicos às plantas, como o que ocorre com Al (Al^{3+}), Mn (Mn^{2+}) e Fe (Fe^{2+}), mesmo sendo esses últimos considerados micronutrientes.

A matéria orgânica do solo (MOS) é fonte de nutrientes e apresenta alta capacidade de gerar cargas elétricas de superfície, por isso, contribui de maneira significativa para o balanço de cargas no solo. Em solos tropicais onde predominam argilominerais 1:1 e os óxidos de Fe e Al, a MOS torna-se a principal fração envolvida na formação de cargas negativas e troca de cátions.

No entanto, os solos de Cerrado apresentam teores médios de MOS, mas reduzida CTC ($< 4 \text{ meq}/100\text{cm}^3$). Lopes (1984) sugere que o pequeno efeito da fração orgânica sobre a CTC se deve a interações com óxidos de Fe e Al da fração argila, que em condições de baixo pH desenvolvem cargas positivas, reduzindo as cargas negativas líquidas. Outra possível explicação é que, em condições de pH ácido, há diminuição da atividade microbiana e insuficiente ionização dos grupos funcionais da MOS (carboxílicos, fenólicos, enólicos e imídicos) para induzir a formação de um número significativo de cargas negativas.

Lopes (1984) observou que em $\text{pH} < 5$ a CTC efetiva tende a diminuir com o aumento da MOS; entre pH 5 e 5,5 há um ligeiro aumento da CTC com o aumento da MOS.

2.4 Agrominerais silicáticos – pesquisas e rotas tecnológicas

Os agrominerais, produtos da indústria de extração mineral, são utilizados como matéria-prima para fertilizantes ou diretamente na agricultura (Fernandes *et al.*, 2010). O elevado custo das matérias-primas no mercado internacional tem incentivado o desenvolvimento de produtos menos solúveis e adaptados às necessidades das plantas. Fertilizantes de liberação lenta, capazes de fornecer nutrientes conforme as fases dos cultivos, destacam-se por reduzir perdas por lixiviação e custos econômicos (Jimenez, 1992).

A prática da rochagem, fundamentada na agrogeologia, utiliza pó de rochas como corretivos e fertilizantes, contribuindo para a fertilidade do solo e o aumento da produtividade agrícola (Hensel, 1898; van Straaten, 2002). Rochas silicáticas multinutrientes apresentam potencial para fornecer uma ampla variedade de nutrientes de forma gradual, reduzindo a lixiviação em climas tropicais e garantindo efeitos residuais positivos (Leonardos *et al.*, 1987; Martins *et al.*, 2008). No entanto, a eficiência agronômica da rochagem depende de fatores como origem da rocha, composição mineralógica, características do solo e espécies cultivadas, o que pode influenciar os resultados obtidos (Leonardos *et al.*, 2000; Martins, 2010).

Do ponto de vista econômico, a viabilidade da rochagem está associada ao custo do transporte e à proximidade entre a fonte do agromineral e a área de cultivo, similar ao modelo adotado pela indústria de calcário (Bolland e Baker, 2000; Martins *et al.*, 2008). Além disso, a utilização de resíduos de mineração, como rejeitos de pedreiras, está alinhada aos princípios da Lei nº 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e ao Plano Nacional de Mineração - PNM 2030, que incentiva práticas sustentáveis e o reaproveitamento de recursos minerais (MME, 2010).

Os agrominerais fonolito, sienito, nefelina sienito e mica xisto possuem características que os tornam promissores para a rochagem. O fonolito é rico em potássio e outros micronutrientes essenciais, apresentando boa solubilidade sob condições tropicais (Ilchenko e Guimarães, 1953; Fujimori, 1984). O sienito, composto por feldspatos e minerais máficos, fornece cálcio, magnésio e potássio, além de ter impacto positivo na fertilidade do solo (Leonardos *et al.*, 1987). O nefelina sienito é uma importante fonte de potássio e sódio, apresentando boa reatividade em solos tropicais (Martins *et al.*, 2008). Já a mica xisto contém teores significativos de potássio, magnésio e ferro, além de ser

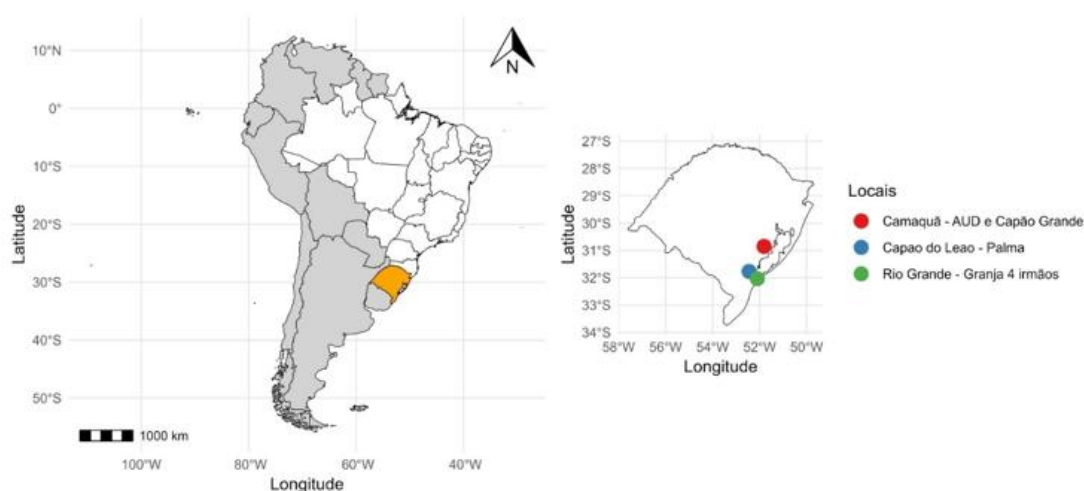
capaz de melhorar a capacidade de troca catiônica do solo, sendo amplamente pesquisado para uso em sistemas agrícolas tropicais (Melamed *et al.*, 2007).

3 Material e Métodos

3.1 Histórico da área, tratamentos e manejo do solo

Os experimentos em condição de campo foram conduzidos no ano agrícola 2023/2024 nos municípios de Capão do Leão na Estação Experimental da UFPel, em Camaquã na Estação Experimental AUD/IRGA e em uma área experimental da sementeira Capão Grande, e em Rio Grande em uma área experimental da Granja 4 Irmãos (Figura 1).

Figura 1- Mapa de localização dos experimentos com fontes de minerais silicatados fontes de potássio



Fonte: Acervo da autora, 2025.

Os solos dos quatro locais são classificados como Planossolo com relevo suave ondulado (Streck *et al.*, 2018) cuja caracterização química previamente ao estabelecimento dos experimentos é detalhada na Figura 2. Em relação aos teores de potássio se observou baixos teores de K nas áreas da Palma e AUD. Já em Rio Grande e Capão Grande se observaram teores médios de K. As recomendações de adubação foram de 110 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O para arroz irrigado para as áreas com teores baixo e médio, respectivamente.

Figura 2- Características químicas dos solos antes do início dos experimentos, ano agrícola 2023

	Camada	Argila	MO	pH	P	K	Ca	Al	Mg	S	CTC pH 7,0	V
Locais	(m)	%		(1:1)	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³			%
Palma	0,2	23	1,66	6,1	13,3	44	4,3	0	2,1	—	8,3	80
AUD	0,2	20	0,97	6,8	30,5	74	4,3	0	2,4	—	8,3	85
Capão Grande	0,2	19	1,66	6,2	121,2	123	5,5	0	2,5	—	10,2	83
Rio Grande	0,2	23	1,1	6,5	30,5	91	5,3	0	2,8	—	10,1	85

Matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), alumínio (Al), magnésio (Mg), enxofre (S), capacidade de troca de cátions em pH 7,0 (CTC), e saturação por bases (V).

Fonte: Adaptado de Streck et al., 2018, s/p.

Os tratamentos foram realizados conforme a Tabela 1. As doses dos agrominerais foram definidas de acordo com a recomendação oficial para as culturas (CQFS - RS/SC, 2016). As parcelas experimentais no campo tinham 3,4 m de largura e 8 m de comprimento, totalizando 27,2 m².

Tabela 1- Tratamentos com diferentes agrominerais usados em experimento com a cultura do arroz irrigado

Tratamento	Fonte	Teor total de K (%)	Doses das fontes aplicadas (kg ha ⁻¹)			
			Palma	AUD	Capão Grande	Rio Grande
T1	Sem adubação potássica	-	-	-	-	-
T2	Cloreto de potássio ¹	49,8	110	110	100	100
T3	Fonolito ²	8,8	3.850	3.850	3.579	3.579
T4	Sienito ²	8,1	4.074	4.074	3.888	3.888
T5	Nefelina Sienito ²	8,3	3.976	3.976	3.795	3.795
T6	Mica Xisto ²	13,0	2.528	2.528	2.423	2.423

Legenda: ¹ Potássio prontamente disponível (100% solúvel em água)

² Potássio de lenta liberação (<1% solúvel em água)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com 4 repetições. As doses dos remineralizadores foram aplicadas em uma quantidade equivalente a 3 vezes a recomendação, considerando o teor de K total. Essa recomendação foi baseada em um experimento previamente conduzido na safra anterior pela Embrapa Clima Temperado em Planossolo.

Os minerais silicatados foram aplicados em abril de 2023 previamente a semeadura do trevo persa. No tratamento com aplicação do fertilizante

convencional, cloreto de potássio, foi aplicado na semeadura da cultura do arroz irrigado.

Nos experimentos de validação agronômica foi estabelecido trevo persa e sucessão com arroz irrigado. Essas estão entre as principais culturas usadas hoje nos sistemas de terras baixas.

A semeadura da cultura do arroz irrigado ocorreu no mês de outubro com densidade de semeadura de 100 kg ha⁻¹ de N. A adubação de base foi de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 150 kg ha⁻¹ de N. (CQFS - RS/SC, 2016). O posicionamento do potássio foi feito conforme os tratamentos. A ureia foi o fertilizante nitrogenado utilizado em cobertura no arroz irrigado, parcelado em duas aplicações, dois terços no estágio V3 e um terço no estágio fenológico R0 (SOSBAI, 2018). A cultura do trevo persa foram semeadas na primeira quinzena do mês de abril sendo usada a cultivar PGW Lightning com densidade de 5 kg ha⁻¹ (CQFS - RS/SC, 2016).

3.2 Análise de atributos químicos do solo

O solo foi coletado em condições de campo nos meses de outubro e novembro de 2023 previamente o cultivo de arroz, em 8 sub-amostras em condições de campo na profundidade de 0-20 cm de profundidade. Posteriormente as amostras foram secas em estufa a 40°C em estufa com circulação de ar forçado e tamisadas em peneiras com 2mm de espaçamento. Posteriormente o teor de K total foi determinado através do procedimento chamado fluorescência de raio x. O teor de potássio disponível foi determinado por mehlich-1, e o teor de potássio trocável foi determinado pelo método de acetato de amônio (Tedesco *et al.*, 1995).

Fluorescência de raio-X por energia dispersiva (FRX) – Composição química total:

Método de análise: As amostras recebem pré-tratamento de secagem em estufa a 45°C, moagem e peneiramento. As análises foram realizadas em equipamento S2 RANGER, fabricante Bruker. Para análise, 8 g de amostra em pó seco (com granulometria de 200 mesh (0,074 mm) foram misturados a 2 g de ligante Goma-WAX e devidamente homogeneizados. A mistura foi prensada sob pressão de 20 toneladas, formando uma pastilha para análise. A análise de FRX

se deu através do modelo de aplicação "EQUA_OXIDES", por 10 minutos. Os resultados levam em conta as avaliações de remineralizadores conforme a Instrução Normativa Nº 6 de 10 de março de 2016. As análises foram realizadas no laboratório multiagro da Universidade de Passo Fundo.

Potássio disponível – Mehlich-1: O método Mehlich I para análise de potássio disponível no solo consiste em utilizar 1 grama de solo, que é colocada em um tubo de centrífuga de vidro com tampa. Em seguida, são adicionados 10 ml da solução de Mehlich I. Esse conjunto é agitado por 5 minutos em um agitador horizontal. Após a agitação, a amostra deve ser deixada em repouso por um período entre 15 e 18 horas. Após o repouso, 3 ml do sobrenadante são retirados para análise, sendo a leitura realizada utilizando um fotômetro de chama.

Potássio trocável (Acetato de amônio a pH 7,0): O método para análise de potássio trocável utiliza 1 grama de solo, que deve ser colocada em um tubo de centrífuga de vidro com tampa. Em seguida, adicionam-se 10 ml de solução extratora de acetato de amônio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) a 1 mol L^{-1} com pH ajustado para 7,0. O tubo é submetido à agitação por 5 minutos em um agitador horizontal. Após esse processo, a amostra é deixada em repouso por um período de 15 a 18 horas. Passado esse tempo, 3 ml do sobrenadante são retirados para análise, e a leitura é realizada utilizando um fotômetro de chama.

3.3 Difração de Raio-X (DRX) – Composição mineralógica da amostra

As amostras recebem pré-tratamento de secagem em estufa a 45°C , moagem e peneiramento. A análise se dá em forma física de pó seco, com granulometria de 400 mesh (equivalente a 0,025 mm). A amostra (aproximadamente 3 g), e foi alocada em uma porta amostra específico para a análise de DRX, então é compactada até ficar plana e paralela à margem do porta amostra. As análises foram realizadas no equipamento D2 PHASER, fabricante Bruker, com regulagens de: Time 0,500 s, 2Theta com incremento de 0,02 e Effective Time de 1650 s. As análises podem variar quanto à sua duração de 30 a 40 minutos. Os difratogramas, após gerados, foram analisados por meio do software Diffrac. EVA e terão suas angulações comparadas com as referências contidas em diferentes literaturas (Brindley e Brown, 1980;

WebMineral,2024; Mindat ,2024). Já a probabilidade e o percentual de composição (análise semiquantitativa) são gerados diretamente pelo software. Gráficos com os percentuais de cada substância que compõem a amostra, bem como os dados gerados através do software. As análises foram realizadas no laboratório multiagro da Universidade de Passo Fundo.

3.4 Composição de nutrientes na biomassa das plantas

Para determinação do teor de nutrientes nos tecidos vegetais nas plantas foram pesados 0,2 g de tecido moído em peneira de 2 mm. Posteriormente essas amostras foram submetidas a digestão ácida e sob alta temperatura para transformação dos nutrientes de formas orgânicas para minerais. Após, no extrato resultante da digestão foi determinado o teor de N total pelo método de destilação Kjeldahl. Os teores de K foram determinados por espectrofotometria de emissão de chama (Tedesco *et al.*, 1995).

3.5 Índice de clorofila total

O teor de clorofila foi determinado a partir da utilização do aparelho Clorofilômetro, aferindo na parte central da folha bandeira. O aparelho utiliza 3 faixas de frequência de luz, tendo uma análise detalhada da folha observando a absorção de luz pela folha e indicando a presença de clorofila.

3.6 Produtividade de grãos

Ao final do ciclo da cultura do arroz, no estágio de maturação fisiológica, a produtividade foi quantificada através da colheita de uma área útil de 2 m x 2 m, totalizando 4,00 m² em cada parcela. Após a colheita, as amostras foram devidamente identificadas e submetidas a trilha. Posteriormente foi feita a retirada das impurezas e a determinação do peso e umidade, que foram utilizadas para o cálculo de produtividade à 13% de umidade, a produtividade foi expressa em Mg ha⁻¹.

3.7 Índice de eficiência agronômica de uso do potássio (IEA%)

O IEA foi calculado com base no diferencial de produção obtido entre as fontes comparadas com a mesma dose de K total aplicado. Para os experimentos de campo foi usada a produção física de grãos de cada tratamento.

$$IEA (\%) = \frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1} \times 100$$

Onde:

y1 = produção obtida pela parcela onde não houve aplicação de potássio;

y2 = produção obtida pela fonte que está sendo testada, com a dose x2;

y3 = produção obtida pela fonte de referência (KCl) na mesma dose (x2) de K total aplicado.

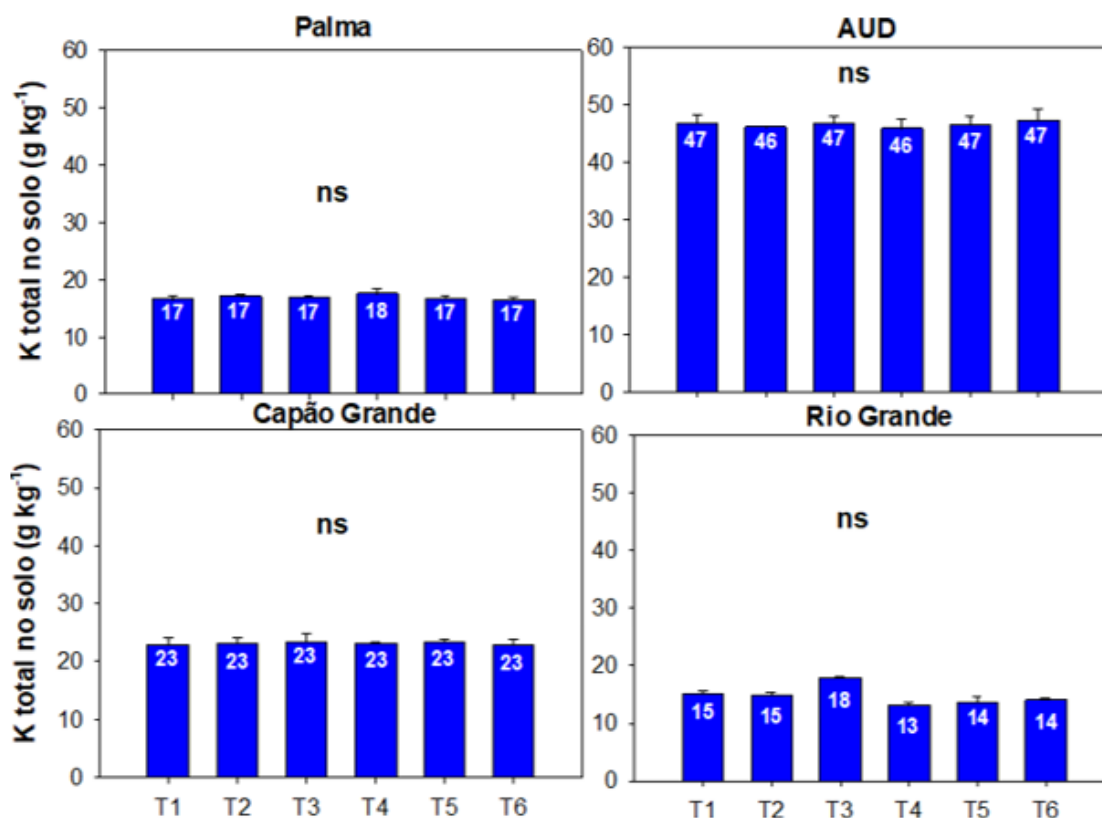
3.8 Análises estatísticas

Os dados do estudo foram submetidos à avaliação de normalidade pelo método de Shapiro-Wilk. Obedecendo aos pressupostos de distribuição normal, as variáveis estudadas foram submetidas a um teste de comparação de médias de Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas com suporte dos programas estatístico R®.

4 Resultados

Na Palma (Figura 3), os valores de potássio total no solo variaram entre 17 e 18 mg/kg em todos os tratamentos, sem apresentar diferenças significativas. Esses resultados sugerem que a fonte de adubação não influenciou o potássio total no solo neste local, sendo o comportamento dos tratamentos bastante uniforme.

Figura 3- Teor potássio total no solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

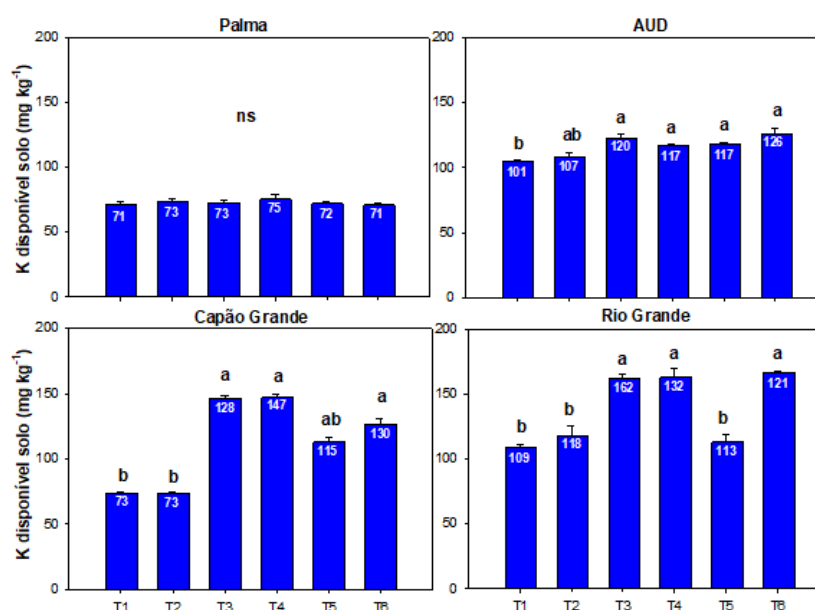
Na estação experimental AUD, os valores variaram entre 46 e 47 mg/kg, novamente sem diferenças significativas entre os tratamentos. Apesar disso, o teor de potássio total encontrado foi maior do que em outros locais, possivelmente refletindo diferenças intrínsecas no solo ou em fatores ambientais que não foram influenciados pelas fontes de potássio aplicadas.

Na Capão Grande, os valores de potássio total no solo foram consistentes em 23 g kg⁻¹ para todos os tratamentos, indicando que as diversas fontes de potássio, incluindo agrominerais e KCl, não impactaram significativamente o teor total de potássio do solo nesta localidade. Este comportamento pode ser atribuído à estabilidade do potássio total, que inclui formas de difícil decomposição no solo.

Em Rio Grande, os valores variaram de 13 a 18 g kg⁻¹, mas também sem diferenças significativas entre os tratamentos. Mesmo com variações ligeiras, os resultados corroboram a ausência de impacto das fontes de potássio no teor total desse nutriente no solo, confirmando que o potássio total abrange minerais menos disponíveis às plantas, independentemente da adubação.

Na Palma, os valores de K disponível (Mehlich I) variam de 70,8 a 75,2 mg kg⁻¹, sem diferença entre os tratamentos (Figura 4). Em AUD, os valores de K disponível variam de 100,7 a 125,9 mg kg⁻¹, com diferenças significativas do T3 ao T6 em relação ao T1 (controle) onde não houve adição de potássio via adubação.

Figura 4- Teor potássio disponível (Mehlich I) no solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey (p<0,05), ns (não significativo).

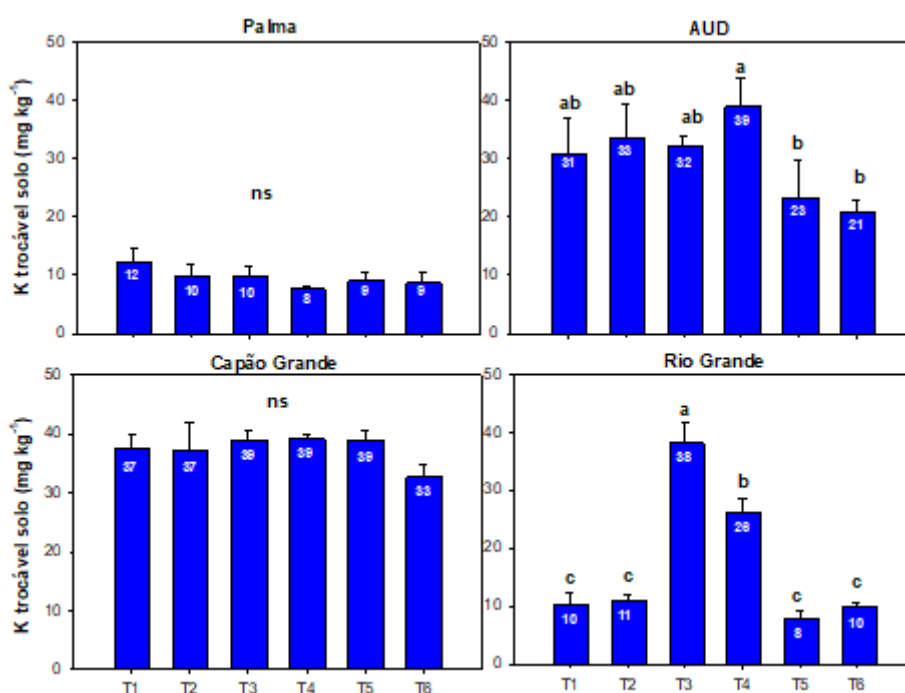


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Em Capão Grande, os valores de K disponível variam de 72,5 a 147,7 mg kg⁻¹, também com maiores teores de K no T3, T4 e T6 em relação ao T1 e T2. Em Rio Grande, os valores de K disponível variam de 113,7 a 162,1 mg kg⁻¹. Em Rio Grande também se observou maiores teores de K disponível no T3, T4 e T6 em relação aos demais tratamentos.

Na Palma, os valores de K trocável (acetato de amônio) (mg kg⁻¹) variam de 7,9 a 12,2 mg kg⁻¹, sendo que não se observou diferença entre os tratamentos (Figura 5).

Figura 5- Teor potássio trocável no solo cultivado com arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey (p<0,05), ns (não significativo).

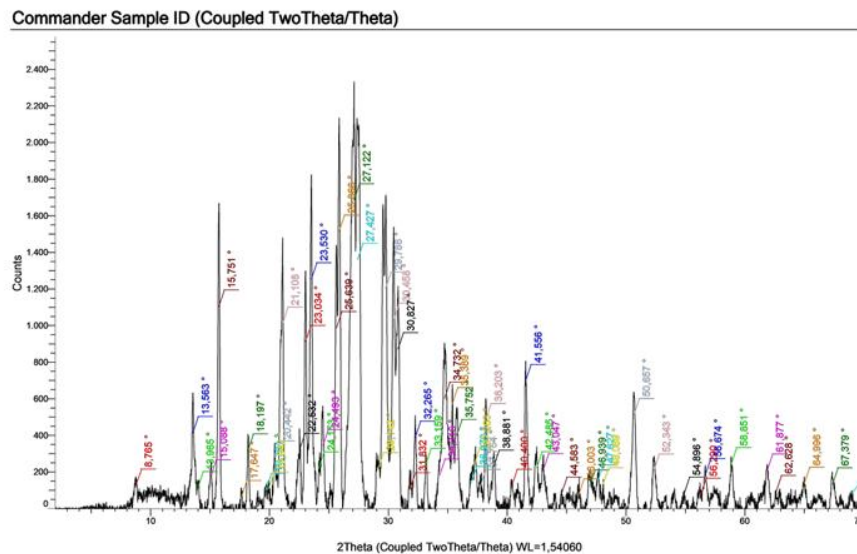


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na AUD os teores de K trocável variaram de 21 a 39 mg kg⁻¹, sendo que o T4 teve maiores teores em comparação ao T5 e T6. Em Capão Grande não se observou diferença entre os tratamentos. Já em Rio Grande o maior teor de K trocável se observou no T3 com 38 mg kg⁻¹, depois no T4 com 26 mg kg⁻¹, sendo esses maiores em relação aos demais tratamentos.

Em relação ao difratograma de raio x do fonolito observou-se a presença de minerais primários sanidina, analcima e ortoclásio (Figura 6).

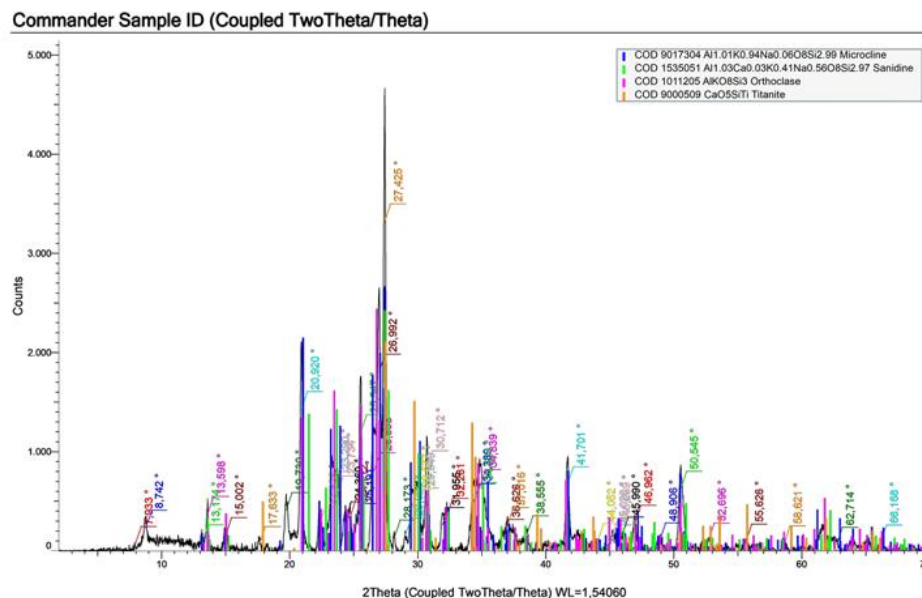
Figura 6- Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de fonolito usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No difratograma de raio x da mica observou-se a presença de minerais primários microclina, sanidina, ortoclásio e titanita (Figura 7).

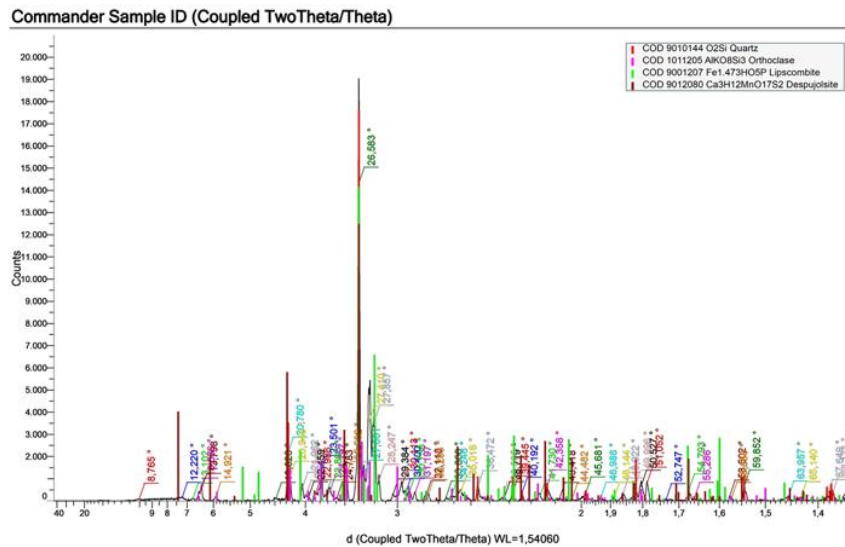
Figura 7- Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de mica usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No difratograma de raio x do sienito observou-se a presença de minerais primários quartzo, ortoclásio, lipscombite e despujolsita (Figura 8).

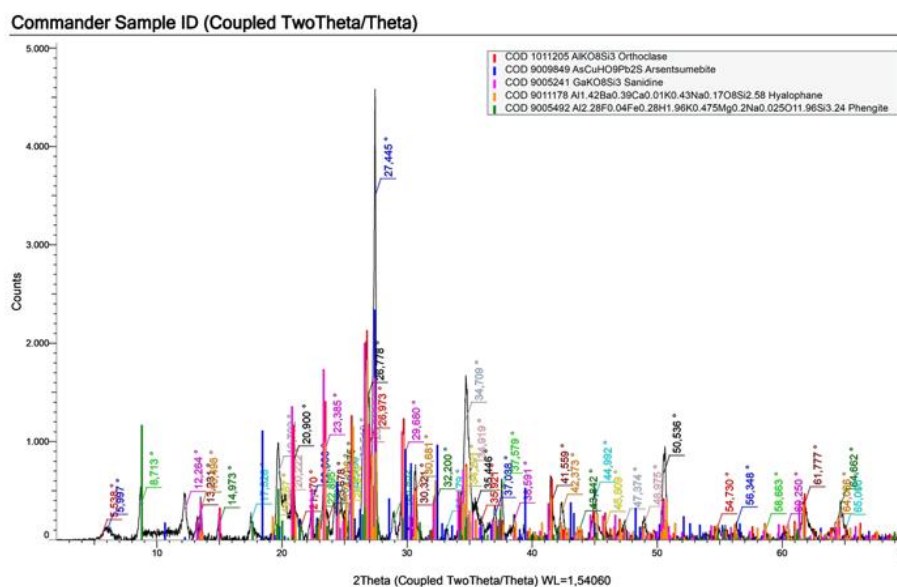
Figura 8- Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de sienito usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Por fim, o difratograma de raio x da nefelina sienito observou-se a presença de minerais primários ortoclasio, arsentsumebita, sanidina, hialofano e fengita (Figura 8).

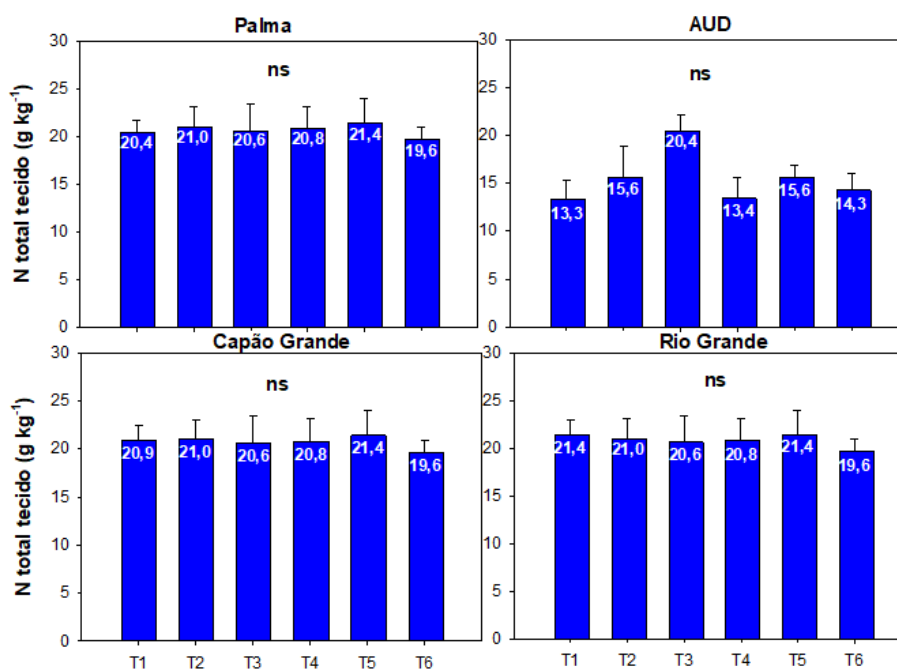
Figura 9- Difratoograma de raio x de caracterização de minerais de nefelina sienito usado como mineral silicatado fonte alternativa de potássio em terras baixas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nos quatro locais de avaliação de aplicação dos remineralizadores fonte de potássio não se observou influência dos tratamentos nos teores de nitrogênio total foliares, sendo que a grande maioria oscilou entre os teores de 19 a 21 g kg⁻¹ de N, a exceção da AUD, onde se observou os menores teores foliares de N (Figura 10).

Figura 10- Teor de nitrogênio na parte aérea das plantas de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey (p<0,05), ns (não significativo)



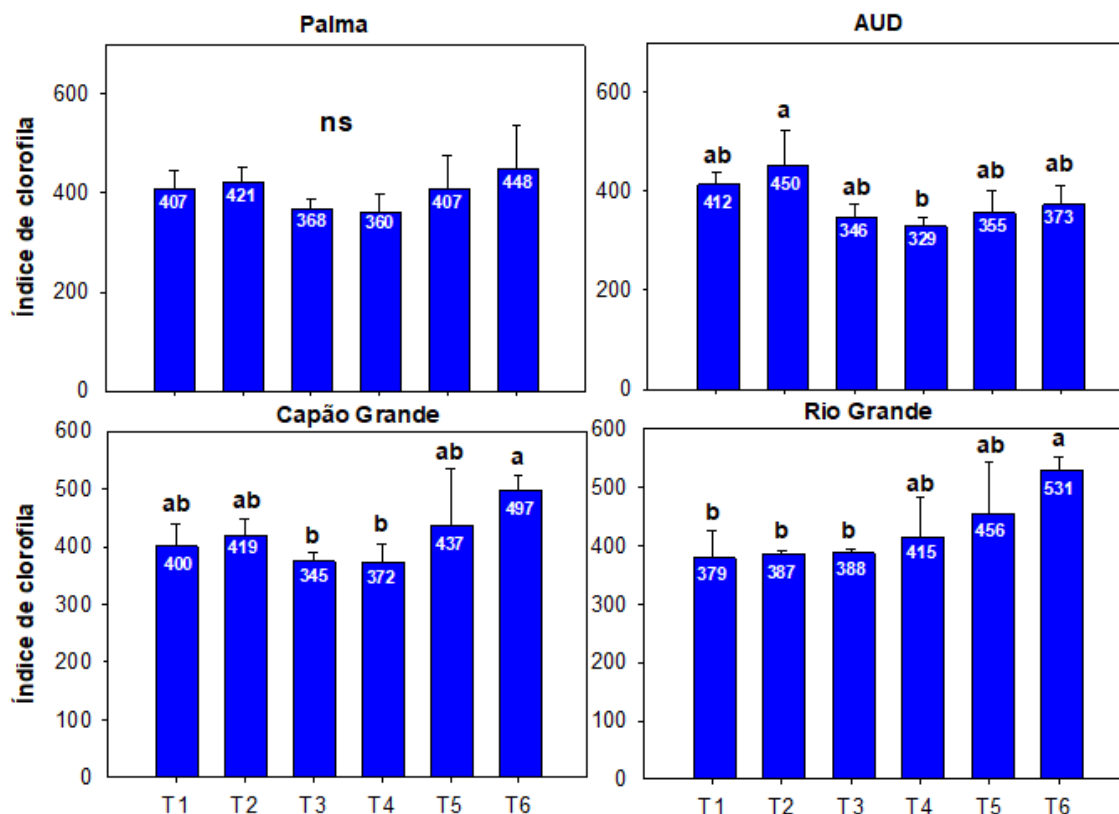
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados (Figura 11) demonstram que o índice de clorofila total das plantas de arroz irrigado variou significativamente dependendo da fonte de adubação potássica utilizada e da localidade estudada. Na Palma, o tratamento com mica xisto destacou-se ao apresentar o maior índice de clorofila total, alcançando 448, o que confirma sua eficácia na liberação gradual de potássio e outros nutrientes essenciais, proporcionando uma nutrição contínua para as plantas.

Na estação experimental AUD, o tratamento com KCl apresentou o maior índice de clorofila, atingindo 450, o que pode ser atribuído à sua alta solubilidade e absorção imediata de potássio pelas plantas. Contudo, os remineralizadores, como o fonolito, o sienito e o nefelina sienito, também mostraram desempenhos

relevantes, embora inferiores ao KCl, destacando seu potencial para liberação gradual do nutriente.

Figura 11- Índice de clorofila total das plantas de arroz irrigado sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)



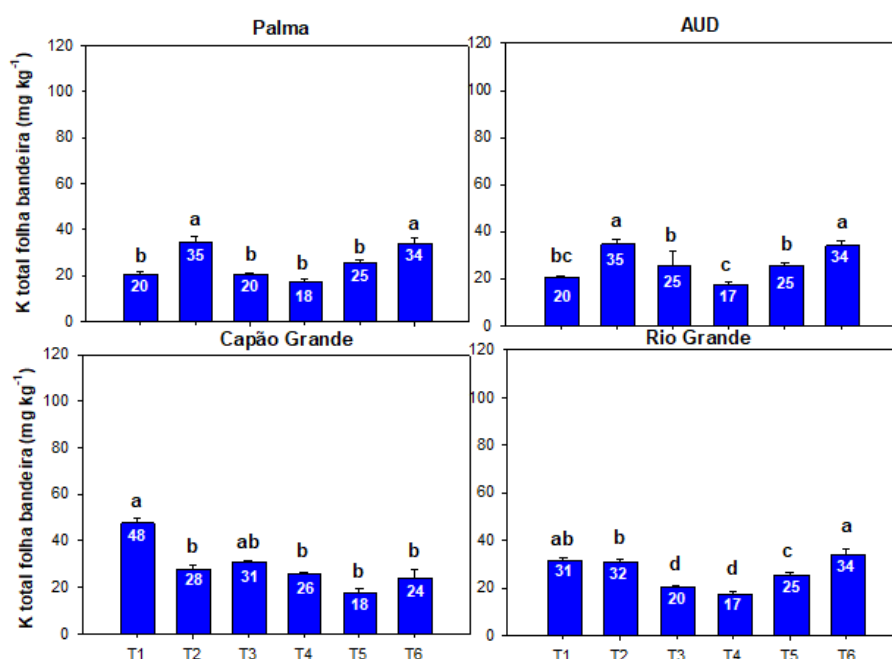
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Em Capão Grande, a mica xisto voltou a se destacar com o maior índice de clorofila, alcançando 497, seguida pelo nefelina sienito, que também apresentou resultados expressivos. Isso reforça a eficiência da mica xisto em liberar potássio de forma contínua, garantindo a nutrição prolongada das plantas.

Na localidade de Rio Grande, os tratamentos com mica xisto, nefelina sienito e sienito obtiveram os maiores índices de clorofila, sendo a mica xisto novamente a mais eficaz, com índice de 531.

Os resultados destacam que, em Palma (Figura 12), o tratamento com cloreto de potássio (T2) obteve o maior teor de potássio total, atingindo 35 mg kg⁻¹, seguido de perto pelo mica xisto (T6), com 34 mg kg⁻¹.

Figura 12- Teor de potássio total na folha bandeira das plantas de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os tratamentos com fonolito (T3), sienito (T4) e nefelina sienito (T5) apresentaram valores intermediários, enquanto o controle (T1) registrou os menores valores, indicando que o T2 e o T6 foram mais eficientes nessa localidade.

Na estação experimental AUD, o comportamento foi semelhante, com o cloreto de potássio (T2) registrando o maior valor de potássio na folha bandeira (35 mg/kg), seguido novamente pelo mica xisto (T6), com 34 mg kg⁻¹. Entretanto, o sienito (T4) apresentou o menor valor nessa localidade, com 17 mg kg⁻¹, o que evidencia sua menor eficácia em liberar potássio de forma significativa em AUD, comparado aos outros tratamentos.

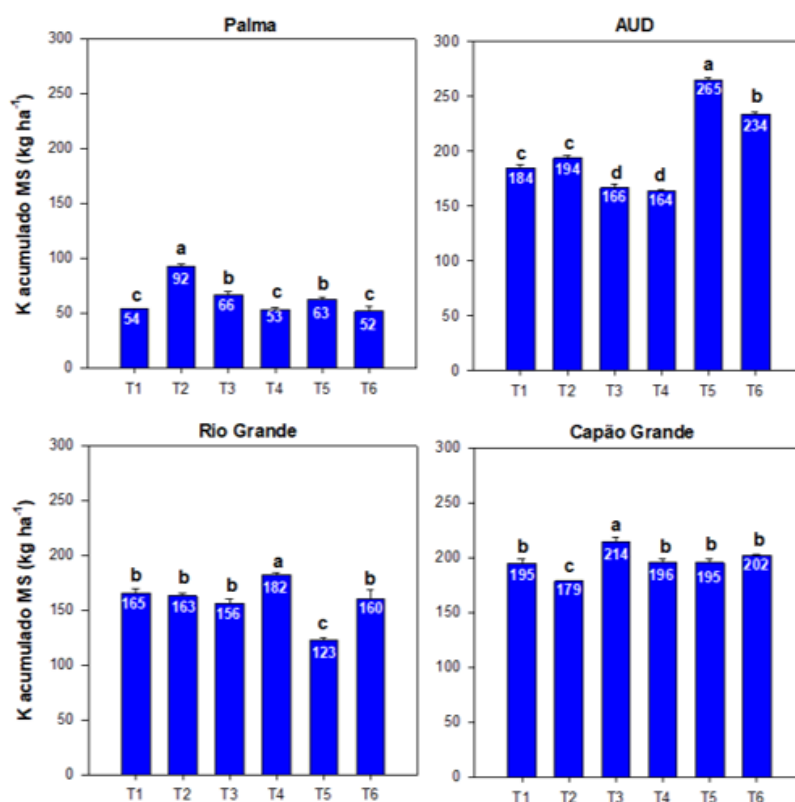
Em Capão Grande, o cenário foi distinto, com o controle (T1) apresentando o maior teor de potássio total, alcançando 48 mg kg⁻¹, um resultado superior aos demais tratamentos. O fonolito (T3) teve um desempenho intermediário (31 mg kg⁻¹), enquanto o sienito (T4) e o nefelina sienito (T5) apresentaram valores mais baixos. Esse resultado sugere que, nesta localidade,

a contribuição do solo para o potássio disponível pode ser significativa, reduzindo a necessidade de adubação suplementar para essa região específica.

Em Rio Grande, o mica xisto (T6) foi o tratamento mais eficaz, com o maior valor de potássio total registrado, 34 mg kg⁻¹, seguido de perto pelo controle (T1), com 32 mg kg⁻¹. O sienito (T4) apresentou o menor valor, com 17 mg kg⁻¹, indicando menor eficácia na liberação de potássio nesse solo. O cloreto de potássio (T2), embora eficaz em outros locais, teve desempenho intermediário em Rio Grande, com 31 mg kg⁻¹.

Os resultados apresentados na Figura 12, indicam que o acúmulo de potássio nas plantas de arroz irrigado varia conforme a fonte de adubação potássica e a localidade.

Figura 13- Teor de potássio acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

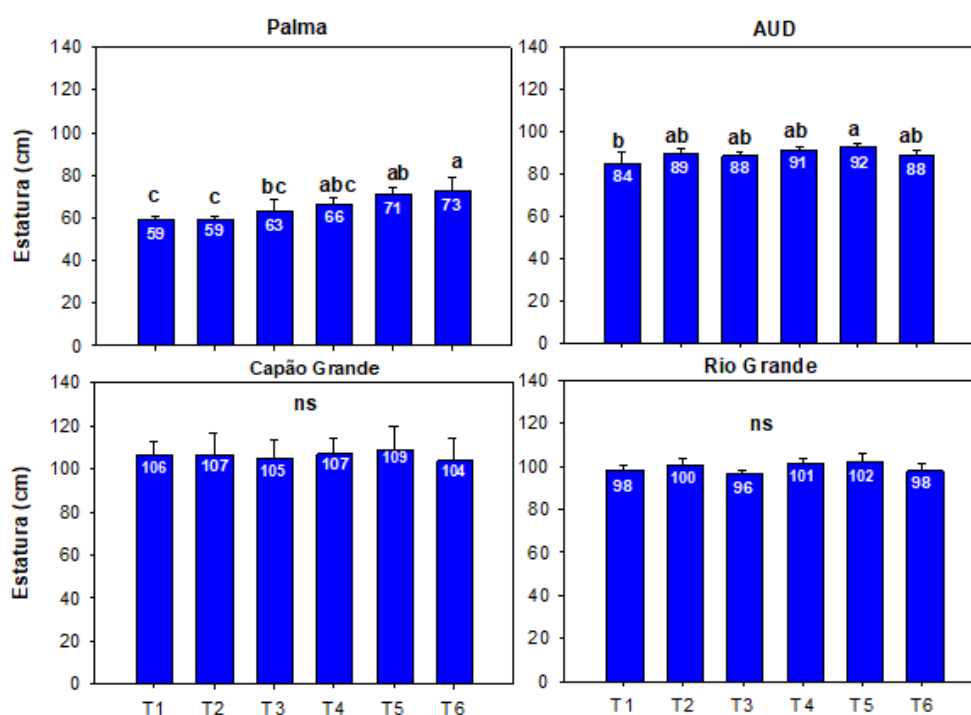
Na Palma, o cloreto de potássio foi o tratamento mais eficaz, apresentando os maiores valores de potássio acumulado, enquanto o grupo

controle, sem adubação, teve o menor desempenho. Na estação experimental AUD, a nefelina sienito destacou-se como a fonte mais eficiente, seguida pela mica xisto, enquanto os outros tratamentos apresentaram valores mais baixos.

Em Rio Grande, o sienito proporcionou o maior acúmulo, e a nefelina sienito teve o menor desempenho. Por fim, em Capão Grande, o fonolito foi o tratamento com os melhores resultados, embora os demais fertilizantes tenham apresentado valores mais próximos uns dos outros.

Na Palma, as plantas submetidas ao tratamento T6 (mica xisto) atingiram a maior estatura, com 73 cm, sendo significativamente superior ao controle (T1), T2 e o T3 (Figura 14). Isso sugere que a mica xisto pode ser uma fonte eficaz de potássio nesse local.

Figura 14- Estatura das plantas de arroz irrigado sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: controle sem adubação potássica; T2: adubação potássica convencional com KCl; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

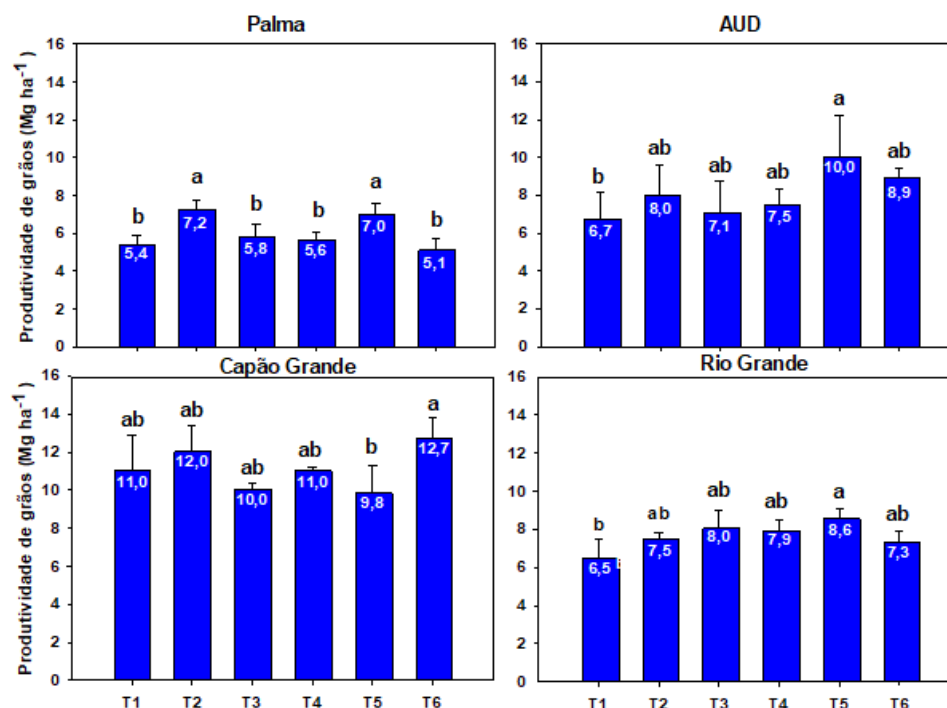
Na AUD, o tratamento T4 (sienito) apresentou a maior estatura e que diferiu em relação ao tratamento controle que obteve 84 cm de estatura. Os demais tratamentos não diferiram do tratamento controle com estaturas de 88 a 89 cm.

Em Capão Grande, os resultados mostram que não houve diferença significativa entre os tratamentos, com todas as alturas variando entre 104 cm e 109 cm. Isso pode indicar que, nesse local específico, as diferentes fontes de potássio não influenciaram de forma significativa a estatura das plantas.

Em Rio Grande, os tratamentos também não mostraram diferenças significativas, com alturas variando entre 96 cm e 102 cm. Semelhante a Capão Grande, as diferentes fontes de potássio não afetaram a estatura das plantas de arroz irrigado.

No centro agropecuário da Palma, os dados revelam que o tratamento T2, adubação potássica convencional com KCl, juntamente com o T5 (nefelina sienito) apresentaram as maiores produtividades com 7,2 e 7,0 Mg ha⁻¹, respectivamente, sendo significativamente superior ao controle (T1) e aos demais tratamentos alternativos (T3, T4 e T6) (Figura 15).

Figura 15- Produtividade de grãos de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey ($p < 0,05$), ns (não significativo)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na estação experimental AUD, novamente se observou que o T5 (nefelina sienito) teve maior produtividade do que o tratamento testemunha. Já os demais

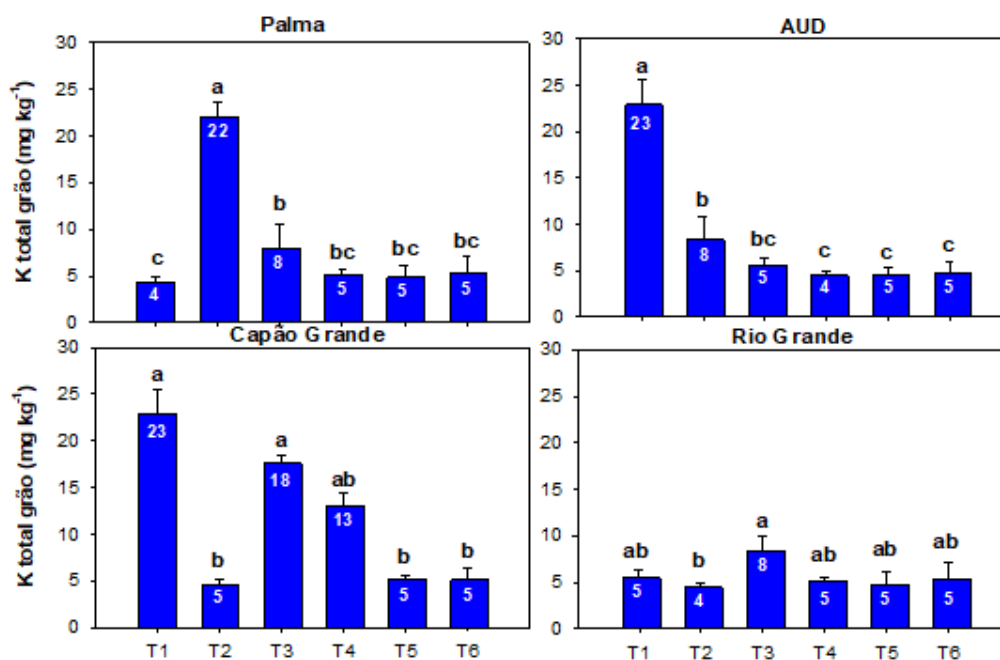
tratamentos não se observaram diferença em relação a testemunha sem adição de potássio.

Na Capão Grande, a diferença entre os tratamentos é menos pronunciada. O T6 (mica xisto) foi o mais produtivo, já os demais tratamentos não tiveram diferença significativa, mesmo ainda o T2 (KCl) que apresentou produtividade de grãos de 12 Mg ha⁻¹.

Em Rio Grande, obteve-se a maior produtividade do T5 com 8,6 Mg ha⁻¹ em relação ao tratamento controle com 6,5 Mg ha⁻¹. Os demais tratamentos tiveram produtividades de 7,3 a 8,0 Mg ha⁻¹.

Na Palma, o tratamento sem adubação potássica (T1) apresentou o maior teor de potássio nos grãos, atingindo 22 mg kg⁻¹, seguido pelo tratamento com cloreto de potássio (T2), com 8 mg kg⁻¹. Os tratamentos com fonolito (T3), sienito (T4), nefelina sienito (T5) e mica xisto (T6) tiveram teores semelhantes, em torno de 5 mg kg⁻¹, indicando que o solo da região pode já ter potássio suficiente disponível para as plantas, tornando os efeitos da adubação menos pronunciados (Figura 16).

Figura 16- Teor de potássio total nos grãos de arroz irrigado, sob diferentes fontes de adubação potássica: T1: sem adubação potássica; T2: cloreto de potássio; T3: fonolito; T4: sienito; T5: nefelina sienito; T6: mica xisto. Ano agrícola 2023/2024. Tukey (p<0,05), ns (não significativo)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na estação experimental AUD, o padrão foi semelhante ao de Palma, com o tratamento T1 apresentando o maior teor de potássio nos grãos, alcançando 23 mg kg⁻¹, seguido pelo tratamento T2, com 8 mg kg⁻¹. Os remineralizadores, incluindo fonolito, sienito, nefelina sienito e mica xisto, mostraram teores próximos, variando entre 4 e 5 mg kg⁻¹, reforçando a ideia de que a ausência de adubação potássica é suficiente para a concentração de potássio nos grãos neste local.

Em Capão Grande, o tratamento T1 também apresentou o maior teor de potássio nos grãos, com 23 mg kg⁻¹, seguido pelo fonolito (T3), com 18 mg kg⁻¹, e pelo sienito (T4), com 13 mg kg⁻¹. Os demais tratamentos, incluindo cloreto de potássio (T2), nefelina sienito (T5) e mica xisto (T6), apresentaram valores inferiores, próximos de 5 mg kg⁻¹. Esses resultados sugerem que o fonolito e o sienito podem ser alternativas eficazes em liberar potássio gradualmente nesta localidade.

Em Rio Grande, os valores foram mais uniformes entre os tratamentos, com T1 e T3 apresentando teores de potássio nos grãos próximos de 8 mg kg⁻¹, enquanto os demais tratamentos, incluindo T2, T4, T5 e T6, registraram valores semelhantes, em torno de 5 mg kg⁻¹. Isso indica que, nesta localidade, os tratamentos potássicos têm um impacto menos significativo na concentração de potássio nos grãos.

A eficiência agronômica dos minerais silicatos (Tabela 2) como fontes alternativas de potássio varia consideravelmente entre os locais e tratamentos.

Tabela 2- Eficiência agronômica dos minerais silicatados utilizados como fontes alternativas de potássio em terras baixas

Tratamento	Índice de eficiência agronômica (IEA%)					
	Palma	AUD	Capão Grande	Rio Grande	Média (%)	Desvio padrão
Controle	-	-	-	-	-	-
Fonolito	20,5	27,9	-105,05	159,2	25,64	93,462
Sienito	11,3	59,5	-0,8582	147,7	54,40	58,417
Nefelina sienito	87,4	272,3	-121,64	211,2	112,32	150,62
Mica xisto	-16,7	176,1	167,88	82,7	102,48	77,928
Referência KCI	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Fonolito teve uma eficiência média de 25,6%, com um desvio padrão de 93,5, indicando uma grande variação entre os locais. O Sienito apresentou uma média de 54,4% e um desvio padrão de 58,4, também indicando variação, mas menos acentuada. A Nefelina sienito teve uma média alta de 112,3%, com um desvio padrão de 150,6, mostrando variação significativa. A Mica xisto apresentou uma média de 102,5% e um desvio padrão de 77,9.

Esses resultados sugerem que a eficiência agronômica desses minerais depende do local de aplicação, com algumas fontes alternativas de potássio mostrando maior eficiência em determinados locais. Porém, se observa que com exceção de Capão Grande a Nefelina sienito foi um mineral silicatado que teve uma alta eficiência agronômica de uso do potássio. Mica Xisto, com exceção da Palma, também foi um mineral silicatado que teve alta eficiência agronômica (>100%).

5 Discussão

Os resultados indicam que tratamentos alternativos, como sienito (T4), nefelina sienito (T5) e fonolito (T3), apresentaram produtividades relativamente altas em alguns locais. Os resultados do presente estudo sugerem que a aplicação de agrominerais pode ser uma alternativa viável ao KCl, dependendo das condições do solo e do clima. Por exemplo, sienito e nefelina sienito podem fornecer potássio gradualmente, reduzindo os impactos negativos associados ao uso de KCl.

A mica xisto (T6) mostrou-se eficaz na Palma, onde as plantas alcançaram 73 cm de estatura, superior ao controle e à maioria dos outros tratamentos. Sendo uma rocha metamórfica rica em potássio, a mica xisto libera nutrientes gradualmente no solo, proporcionando uma nutrição contínua para as plantas.

Os resultados indicam que essa aplicação pode melhorar a disponibilidade de potássio no solo, resultando em um crescimento vegetal robusto. Na estação experimental AUD, tratamentos com sienito (T4) e nefelina sienito (T5) resultaram nas maiores alturas das plantas, com 91,2 cm e 92,4 cm, respectivamente, demonstrando eficácia em certas condições de solo e clima.

Embora o KCl seja altamente eficaz em aumentar o teor de nitrogênio e a clorofila total das plantas, é importante considerar alternativas que minimizem os impactos negativos no solo e no ambiente como o acúmulo de sais no solo, o que pode afetar negativamente a microbiota do solo e reduzir a atividade microbiana essencial para a saúde do ecossistema (Pereira *et al.*, 2019). A escolha do tipo de adubação deve levar em conta as condições específicas de cada local, como a textura do solo e a disponibilidade de nutrientes.

Na Palma, o tratamento com cloreto de potássio destacou-se ao apresentar o maior acúmulo de potássio, enquanto o tratamento sem adubação teve os valores mais baixos. Na estação experimental AUD, o uso de nefelina sienito proporcionou o maior acúmulo de potássio na parte aérea das plantas, seguido de perto pelo uso de mica xisto, com os demais tratamentos apresentando teores mais equilibrados e moderados.

Já em Rio Grande, o maior acúmulo foi obtido com o tratamento baseado em sienito, enquanto o tratamento com nefelina sienito mostrou o menor desempenho entre todos. Por fim, no Capão Grande, o fonolito se destacou

como o tratamento mais eficaz em promover o acúmulo de potássio, seguido de perto pelos demais, que demonstraram teores mais próximos e homogêneos entre si. Esses resultados revelam que a eficácia das diferentes fontes de adubação potássica varia significativamente de acordo com a localização, sugerindo que os fatores ambientais podem ter influência no aproveitamento desses insumos pelas plantas.

Os valores de potássio total no solo não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos nos locais estudados (Palma, AUD, Capão Grande e Rio Grande), sugerindo que as diferentes fontes de adubação potássica não impactaram significativamente o teor de potássio total no solo. O potássio total inclui minerais de difícil decomposição que não estão prontamente disponíveis para as plantas. No entanto, houve diferenças significativas na disponibilidade de potássio no solo entre os tratamentos, especialmente na AUD e em Capão Grande, onde fonolito (T3), sienito (T4) e nefelina sienito (T5) se destacaram. Esses agrominerais podem liberar potássio gradualmente, aumentando a disponibilidade do nutriente e beneficiando a absorção pelas plantas.

Os valores de potássio trocável no solo também mostraram diferenças significativas entre os tratamentos em todos os locais estudados. Fonolito (T3), sienito (T4) e nefelina sienito (T5) apresentaram valores significativamente maiores em comparação com o controle (T1) e a mica xisto (T6), indicando eficácia em aumentar a fração de potássio prontamente disponível para as plantas.

Essas descobertas sugerem que a escolha da fonte de adubação potássica deve considerar as condições locais do solo e as necessidades nutricionais das plantas para maximizar a eficácia da adubação e minimizar os impactos negativos no solo e no ambiente.

O fonolito é uma rocha vulcânica alcalina composta principalmente por minerais feldspatoides, como nefelina, leucita, sodalita e analcita, além de feldspatos alcalinos, como sanidina e anortoclásio. Esses minerais conferem ao fonolito sua cor clara característica e contribuem para sua densidade relativamente baixa (Teixeira *et al.*, 2012).

O fonolito se forma a partir de magmas com baixo teor de sílica, gerados por baixos graus de fusão parcial de rochas altamente aluminosas das camadas

inferiores da crosta terrestre. É frequentemente encontrado em regiões vulcânicas ao redor do mundo e está associado a rochas vulcânicas alcalinas. O fonolito tem importância econômica em algumas regiões, sendo utilizado como fonte alternativa de potássio na agricultura (Geoscience, 2023).

A mica xisto é uma rocha metamórfica caracterizada por sua textura foliada, composta principalmente por minerais do grupo das micas, como a biotita e a muscovita. Esses minerais são filossilicatos, o que significa que possuem uma estrutura em camadas ou folhas, conferindo à mica xisto sua aparência laminada e brilhante (Martins *et al.*, 2008). A mica xisto se forma a partir da metamorfose de rochas sedimentares ricas em argila, como os argilitos, sob condições de alta pressão e temperatura. Esse processo de metamorfismo recristaliza os minerais originais, formando novos minerais e texturas.

É frequentemente encontrado em regiões de atividade tectônica intensa, onde as rochas são submetidas a forças compressivas e deformação. Uma das características mais notáveis da mica xisto é sua foliação bem definida, que permite que a rocha se quebre facilmente ao longo de planos paralelos. Essa propriedade torna a mica xisto útil em aplicações como material de construção e decoração. Além disso, devido à presença de micas, a mica xisto pode ser utilizado como fonte de minerais industriais (Martins *et al.*, 2008).

O sienito é uma rocha ígnea plutônica (intrusiva) de granulação grossa, composta principalmente por minerais feldspatos, como ortoclásio, e frequentemente inclui quantidades menores de outros minerais, como hornblenda, mica ou anfibólio. Ao contrário do granito, que é outra rocha ígnea intrusiva comum, o sienito contém pouco ou nenhum quartzo. A presença dominante de feldspato, especialmente ortoclásio, confere ao sienito sua composição e aparência distintas (Geosciencie, 2023).

O sienito se forma através do lento resfriamento e solidificação do magma derretido nas profundezas da superfície da Terra. É frequentemente encontrado em ambientes geológicos associados a formações rochosas plutônicas, muitas vezes nos núcleos de cadeias de montanhas ou dentro da crosta terrestre. Devido à sua durabilidade, o sienito é frequentemente utilizado como pedra ornamental em construção e aplicações decorativas (USP, 2025).

O nefelina sienito é uma rocha ígnea intrusiva rica em feldspatoides, com a nefelina sendo o mineral predominante, acompanhada por feldspatos alcalinos

como ortoclásio e microclínio. Esta rocha tem uma textura granular e, devido à ausência ou presença mínima de quartzo, se distingue do granito e de outras rochas ígneas comuns. O nefelina sienito se forma a partir do resfriamento lento de magmas com baixo teor de sílica nas profundezas da crosta terrestre, frequentemente em ambientes geológicos associados a zonas de rifte e outros contextos tectônicos (CETEM, 2005).

O nefelina sienito é frequentemente encontrado em complexos ígneos alcalinos, e sua formação está relacionada a processos de diferenciação magmática que resultam na concentração de minerais ricos em álcalis.

Os resultados obtidos, que destacam a eficácia de remineralizadores como fonolito, sienito, nefelina sienito e mica xisto na liberação gradual de potássio em terras baixas, encontram suporte em trabalhos recentes. Por exemplo, (Britzke *et al.*, 2011) analisaram a dinâmica do potássio em solos de terras baixas no sul do Brasil, destacando que minerais como feldspatos e micas presentes em remineralizadores contribuem para a liberação de potássio não trocável, que se torna disponível para as plantas ao longo do tempo. Esses achados corroboram os resultados positivos obtidos em suas experimentações, especialmente com o sienito e o nefelina sienito na estação experimental AUD.

Um estudo relevante de Ghosh *et al.* (2023) investigou o uso de bactérias mobilizadoras de potássio (KMB) em combinação com mica xisto, demonstrando que a interação entre microrganismos e minerais aumenta a liberação de potássio em solos agrícolas. Esse efeito reforça os resultados observados na região de Palma, onde a mica xisto foi eficaz ao proporcionar maior estatura das plantas (73 cm) devido à liberação contínua de potássio e nutrientes.

Além disso, uma pesquisa recente de Artuso *et al.* (2024) sobre a distribuição vertical de potássio em solos sob sistema de plantio direto no Rio Grande do Sul destaca que fertilizantes solúveis, como o KCl, podem levar a perdas significativas de potássio por lixiviação em solos de baixa capacidade de troca catiônica. Isso reforça a relevância dos remineralizadores como o fonolito, que liberam potássio gradualmente, minimizando perdas e otimizando a eficiência agrônômica, como demonstrado em seus resultados.

As condições redox que ocorrem em solos alagados podem influenciar nas taxas de liberação de potássio. Com o estabelecimento da lâmina de irrigação há uma redução drástica na difusão de oxigênio, e assim, há a

formação de um ambiente de hipóxia em solos sob cultivo de arroz irrigado (Sousa *et al.*, 2002). Essa anaerobiose pode reduzir óxidos de Fe e Mn (Sousa *et al.*, 2002), esses elementos dissolvidos na forma catiônica na solução do solo podem favorecer a liberação de potássio dos minerais primários. Além disso, a presença constante de água pode favorecer processos de hidrólise e acelerar a liberação de potássio dos minerais comparado com remineralizadores quando aplicados em solo sob cultivo de culturas de sequeiro.

A liberação de potássio (K) a partir de minerais como mica e nefelina sienito tem sido amplamente estudada devido ao seu potencial como fertilizantes alternativos em sistemas agrícolas. Em culturas como o arroz irrigado, onde a demanda por K é alta, essas fontes minerais oferecem uma solução promissora, especialmente em regiões tropicais, onde a lixiviação do potássio solúvel representa um desafio significativo (Leonardos *et al.*, 2000). O potássio é um macronutriente essencial, fundamental para processos fisiológicos como a fotossíntese, a síntese de proteínas e a regulação hídrica das plantas. No entanto, a principal fonte convencional de K, o cloreto de potássio (KCl), apresenta alta solubilidade e, conseqüentemente, um elevado risco de perda por lixiviação em sistemas de irrigação. Essa característica diminui a eficiência do uso do K pelos cultivos, exigindo aplicações frequentes para manter níveis adequados no solo.

A mica, particularmente a muscovita, contém cerca de 8-10% de K_2O , enquanto a nefelina sienito apresenta um teor de K_2O de aproximadamente 5-7% (Basak, 2019). Embora o conteúdo total de potássio na nefelina sienito seja menor, sua estrutura mineral permite uma liberação mais acessível do nutriente em comparação com a mica, devido à menor estabilidade dos silicatos presentes em sua composição (Manning, 2010).

Os estudos indicam que a disponibilização do K desses minerais está diretamente ligada à interação com exsudatos radiculares e ácidos orgânicos presentes no solo, como o ácido cítrico e o ácido nítrico (Harley e Gilkes, 2000). A ação desses ácidos favorece o intemperismo dos minerais, quebrando ligações estruturais e tornando o K gradualmente disponível para absorção pelas plantas.

A granulometria dos minerais também desempenha um papel crucial na liberação do potássio. Partículas menores de mica e nefelina sienito apresentam

maior área superficial, facilitando sua interação com os ácidos orgânicos presentes na rizosfera (Wang *et al.*, 2000). Estudos indicam que partículas finas ($\leq 125 \mu\text{m}$) liberam K significativamente mais rápido do que partículas mais grossas ($\geq 1000 \mu\text{m}$), favorecendo a nutrição das plantas ao longo do ciclo de cultivo. No caso do arroz irrigado, esse efeito é particularmente relevante, pois a presença constante de água no solo potencializa a dissolução dos minerais e a mobilização do K na solução do solo. Além disso, o arroz tem um sistema radicular altamente eficiente na aquisição de nutrientes, o que reforça o potencial das fontes minerais como alternativa viável ao KCl.

Outro aspecto relevante é a retenção do potássio no solo. Ao contrário do KCl, que se dissolve rapidamente e pode ser perdido por lixiviação, a mica e a nefelina sienito atuam como fontes de liberação lenta, recarregando continuamente os reservatórios de K no solo (Basak *et al.*, 2017). Esse efeito prolongado contribui para um fornecimento mais sustentável de potássio ao longo do ciclo de cultivo, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes e minimizando impactos ambientais decorrentes do uso excessivo de fertilizantes convencionais. Além disso, em solos tropicais altamente intemperizados, onde a eficiência do KCl pode ser comprometida, esses minerais representam uma opção particularmente interessante para garantir níveis adequados de K e manter a produtividade agrícola (Leonardos *et al.*, 2000).

Com base nesses fatores, a aplicação de mica e nefelina sienito no cultivo de arroz irrigado pode ser uma alternativa eficaz para suprir a demanda de K, garantindo nutrição adequada e reduzindo as perdas por lixiviação. No entanto, estudos de longo prazo ainda são necessários para avaliar sua eficiência em diferentes tipos de solo e condições de manejo agrícola. O desenvolvimento de estratégias que envolvam esses minerais pode contribuir significativamente para a sustentabilidade da produção agrícola, diminuindo a dependência de fertilizantes solúveis e promovendo o uso racional dos recursos naturais.

6 Conclusão

A nefelina sienito possui produtividade de grãos de arroz comparável a adubação convencional com KCl. A mica xisto em três dos quatro locais tem produtividade de grãos de arroz comparável com KCl.

Os teores de K disponível (Mehlich-1) no solo sob aplicação de todos os minerais silicatados são comparáveis ao tratamento com aplicação de KCl.

A nefelina sienito e a mica xisto com eficiência agrônômica de uso de potássio de 112 e 102%, respectivamente, e assim, demonstram que são fontes alternativas de potássio para a cultura do arroz.

Dessa forma, os minerais silicatados são fontes que podem suprir potássio para a cultura do arroz irrigado. Contudo, ressalta-se que esse trabalho de pesquisa foi conduzido durante uma safra em 4 locais tradicionais de cultivo de arroz no Rio Grande do Sul.

Estudos com uso dessas fontes conduzido por maior número de safras é relevante no sentido de avaliar se pode haver a depleção dos teores de K do solo (Mehlich-1), e reflexos na nutrição, produtividade de grãos e eficiência de uso do potássio pelas culturas. Esse estudo por tempo mais prolongado é importante, pois a cultura do arroz em apenas um ciclo pode estar explorando reservas de potássio adicionadas por fertilizantes potássicos aportados ao solo ao longo do histórico de exploração agrícola.

Referências

AMRHEIN, C.; SUAREZ, D. L. Some factors affecting the dissolution kinetics of anorthite at 25° C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 56, p. 1815-1826, 1992.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 325-380, 2013.

ARTUSO, D. R. *et al.* Potassium distribution in soil profiles under no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0230125, 2024.

BASAK, B. B. Waste Mica as Alternative Source of Plant-Available Potassium: Evaluation of Agronomic Potential Through Chemical and Biological Methods. **Natural Resources Research**, v. 28, n. 3, p. 953–970, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9430-3>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9430-3>. Acesso em: 7 maio 2025.

BERNER, R. A. Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions. **American Journal of Science**, v. 278, p. 1235-1252, 1978.

BIBER, M. V.; AFONSO, M. S.; STUMM, W. The coordination chemistry of weathering: IV. Inhibition of the dissolution of oxide minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 58, p. 1999-2010, 1994.

BOENI, M. *et al.* **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: [s. n.], 2010.

BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. **Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification**. London: Mineralogical Society, 1980. (Monograph, 5).

BRITZKE, D. *et al.* A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical Brazilian lowlands. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, p. 185–197, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0431-7>.

CARLOS, F. S. *et al.* Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation & Development**, v. 31, p. 2962-2972, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3653>.

CASEY, W. H.; BUNKER, B. The leaching of mineral and glass surfaces during dissolution. In: HOCELLA JR., M. F.; WHITE, A. (ed.). **Mineral-Water Interface Geochemistry**. Washington: Mineralogical Society of American, 1990. (Reviews in Mineralogy, v. 13). p. 397-426.

CETEM. **Nefelina Sienito**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1083/2/26.NEFELINA%20SIENITO%20ok.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO (CQFS RS/SC). **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

DREVER, J. I. **The geochemistry of natural waters**. New Jersey: Prentice Hall, 1988. 202 p.

EMBRAPA. **Documentos sobre sistematização e manejo de terras baixas no Rio Grande do Sul**. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1127754/1/DOCUMENTOS-489.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2025.

EMBRAPA. **Estação Terras Baixas da Embrapa**: estudos sobre solos da região sul do Brasil. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/1354346/43236118/circular152_SOLOS_E_TB_NOEL.pdf. Acesso em: 24 mar. 2025.

FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. v. 1. 380 p.

FUJIMORI, K. Desenvolvimento da tecnologia de produção do fertilizante potássico tipo kalsilita, próprio para agricultura tropical a partir das rochas

potássicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBG, 1984. p. 4892-4902.

GEOSCIENCE. **Fonolito**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://pt.geologyscience.com/rochas/Rochas-%C3%ADgneas/rochas-%C3%ADgneas-extrusivas/fon%C3%B3lito/>. Acesso em: 26 mar. 2025.

GEOSCIENCE. **Sienito**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://pt.geologyscience.com/rochas/Rochas-%C3%ADgneas/sienito/>. Acesso em: 26 mar. 2025.

GHOSH, S. *et al.* Temporal dynamics of potassium release from mica waste influenced by potassium mobilizing bacteria. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, v. 17, n. 1, p. 273-288, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.1.17>.

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, p. 11–36, 2000.

HENSEL, J. **Brout und Stein**. Tradução Sebastião Pinheiro. Porto Alegre: Fundação Juquira Candiru, 2003. (Trabalho original publicado em 1889).

HOLDREN, G. R.; BERNER, R. A. Mechanism of feldspar weathering: I. Experimental Studies. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 43, p. 1161-1171, 1979.

ILCHENKO, A.; GUIMARÃES, J. **Solubilização via ataque ácido em rochas silicáticas alcalinas (fonolito)**. Rio de Janeiro: [s. n.], 1953.

JIMENEZ GÓMEZ, S. **Fertilizantes de Liberación Lenta**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. 126 p.

KALINOWSKI, B. E. **Dissolution kinetics and alteration products of micas and epidote in acidic solutions at room temperature**. 1997. 62 f. Doctoral thesis (Doctor in Philosophy) - Department of Geology and Geochemistry, Stockholm University, Stockholm, 1997.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, R. F. (ed.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 334-371.

LEONARDOS, O. H. *et al.* **Rochas silicáticas multinutrientes como fontes alternativas de nutrientes**. Brasília: [s. n.], 1987.

LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KROMBERG, B. I. Rochagem: método de aumento de fertilidade em solos lixiviados e arenosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976, Ouro Preto. **Anais** [...]. Ouro Preto: SBG, 1976. p. 137-145.

LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KROMBERG, B. I. The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, v. 60, p. 361-370, 1987.

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. 56, p. 3-9, 2000.

LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”**: características, propriedades e manejo. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 162 p.

LOUGHNAN, F. C. **Chemical weathering of silicate minerals**. New York: Elsevier, 1969. 146 p.

MANNING, D. A. C. Mineral sources of potassium for plant nutrition: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 30, p. 281–294, 2010.

MAPA. **Home**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/>. Acesso em: 14 set. 2022.

MARQUES NETO, G. C. *et al.* Understanding the dynamics of attributes of medium and short cycle rice cultivars under nitrogen effect. **Ciência Rural**, v. 53, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478CR20210584>.

MARTINS, E. S. *et al.* Agrominerais – Rochas Silicáticas como Fontes Minerais Alternativas de Potássio para a Agricultura. In: LUZ, A. B.; LINS, F. (ed.). **Rochas e Minerais Industriais** – Usos e Especificações. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 205-221.

MARTINS, E. S. *et al.* Materiais Silicáticos como Fontes Regionais de Nutrientes e Condicionadores de Solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. (org.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. v. 1. p. 89-104.

MELAMED, R.; GASPAR, J.; MIEKELEY, N. **Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 24 p. (Série Estudos e Documentos, SED-72).

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Gênese, 2008. 290 p.

MINDAT. **Dados de mineralogia**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.mindat.org/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Mineração 2030** (PNM – 2030). Brasília: MME, 2010. 178 p.

NAHON, D. B. **Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 313 p.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 276-374.

PERES, M. M. **Avaliação agrônômica de rocha ígnea extrusiva da Formação Serra Geral como fonte de potássio**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2018.

SOUSA, R.; BOHNEN, H.; MEURER, E. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 343-348, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200007>.

STRECK, E. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater-RS, 2008.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters**. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. (Boletim Técnico, 5).

TEIXEIRA, A. M. S. *et al.* Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **HOLOS**, Natal, v. 5, p. 21-33, 2012. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549279003>. Acesso em: 26 mar. 2025.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação dos solos. In: TEIXEIRA, W. *et al.* (ed.). **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008. p. 210-239.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Sienito**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/rochas/igneas/sienito/>. Acesso em: 26 mar. 2025.

VAN STRAATEN, P. **Rocks for crops: Agrominerals of Sub-Saharan Africa**. Nairobi: ICRAF, 2002. 338 p.

WANG, J. G. *et al.* Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, p. 37–44, 2000.

WEBMINERAL. **Dados de mineralogia**. [S. l.], 2024. Disponível em: <http://webmineral.com/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

WHITE, A. F. *et al.* The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 58, p. 2761-2775, 1999.