

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**BRUNO BISPO DOS SANTOS**

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE DUAS GRANULOMETRIAS DE UM CO-  
PRODUTO DE MINERADORA PARA UTILIZAÇÃO COMO REMINERALIZADOR  
DE SOLO**

**RECIFE**

**2025**

Bruno Bispo dos Santos

Engenheiro Agrônomo

**Eficiência agronômica de duas granulometrias de um co-produto de mineradora  
para utilização como remineralizador de solo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora:

Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas

Coorientadora:

Dra. Juscélia da Silva Ferreira

**Recife**

**2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S237e Santos, Bruno Bispo dos.  
Eficiência agronômica de duas granulometrias de um co-produto de mineradora para utilização como remineralizador de solo / Bruno Bispo dos Santos. - Recife, 2025.  
48 f.; il.

Orientador(a): Ana Dolores Santiago de Freitas.  
Co-orientador(a): Juscélia da Silva Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Soja . 2. Milho. 3. Rochagem . 4. Nutrientes  
5. Resíduos industriais. I. Freitas, Ana Dolores Santiago de, orient. II. Ferreira, Juscélia da Silva, coorient. III. Título

CDD 631.4

BRUNO BISPO DOS SANTOS

**Eficiência agronômica de duas granulometrias de um co-produto de mineradora  
para utilização como remineralizador de solo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

Aprovada em 10 de março de 2025

---

Prof. Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas  
Orientadora

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado o dom da vida, por sempre estar comigo nos momentos que mais precisei e por tudo que Ele tem feito por mim.

Aos meus pais, Geane e José Edilso, por todo o amor e por sempre me apoiarem em minhas escolhas e as minhas irmãs Edijane e Alyce, que sempre acreditaram em mim.

Aos meus avós, Maura e Antônio, que me criaram como seu filho, por todo o amor e apoio ao longo de minha vida.

Ao Grupo de Pesquisa GFBN no qual considero uma verdadeira família. Sem o apoio e ajuda de seus integrantes, essa pesquisa não teria acontecido.

Aos amigos: Pablo, Karoll, Mariana, Laura, Júlia, Micael, Irla, Sandra, Alcileia, Bruna, Rachel, Maria Mariana, Vênus, Cláudia, Evellyn, Regina e todos aqueles tornaram meus dias mais alegres. Sem o apoio e o amor de vocês eu não teria chegado até aqui, minha eterna gratidão!

A professora e orientadora Dra. Ana Dolores e minha Coorientadora Dra. Juscélia Ferreira, as quais considero minhas mães durante o tempo em que estive longe de casa. Meu muito obrigado por terem se prontificado a trilhar comigo esse desafio e por todos os ensinamentos passados durante a realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão de bolsa de estudo, por todo o suporte para se fazer ciência de qualidade.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

## **Eficiência agrônômica de duas granulometrias de um co-produto de mineradora para utilização como remineralizador de solo**

### **RESUMO**

A diminuição de nutrientes nos solos ameaça a segurança alimentar global e tem sido seriamente subestimada, principalmente para o potássio (K). Este é particularmente o caso de solos altamente intemperizados em países tropicais, onde os fertilizantes minerais geralmente são pouco acessíveis. Uma maneira de reabastecer macro e micronutrientes são os pós de rocha. Os minerais que formam as rochas contêm a maioria dos nutrientes essenciais para as plantas, mas taxas de intemperismo lentas e inconsistentes restringiram seu uso no passado. Atualmente, o uso de remineralizadores configura-se como uma possibilidade, já que esses insumos se comportam como um tipo de rejuvenescedor dos solos pobres ou lixiviados, onde o pó de rocha é utilizado para a reposição dos nutrientes. No Brasil, uma ampla gama de exigências são propostas para validar a utilização de pós de rocha em cultivos, que vão desde a capacidade de melhoria do crescimento da planta até benefícios mais estratégicos. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência agrônômica de um pó de rocha em duas granulometrias (<2,00mm e <0,85mm), seis doses (0, 100, 200, 300, 400 e 500% da recomendação de K<sub>2</sub>O para as culturas de milho e soja) e dois solos, para classificação como remineralizador de solo. Um ensaio de incubação foi feito em delineamento experimental em blocos casualizados, com arranjo fatorial triplo 2\*6\*2, com cinco repetições. O pó foi incubado por 150 dias em porções de 100 g de solo, com amostragens aos 7, 30, 60, 90, 120 e 150 dias. Um experimento em vasos, em casa de vegetação, foi montado com as mesmas granulometrias e doses e seis cultivos sucessivos de milho ou soja, além de tratamentos recebendo KCl, considerado como fonte referência, em dose equivalente à recomendada. Os vasos receberam uma única aplicação inicial do pó e do fertilizante e água diariamente, para manter a umidade em 80 % da capacidade de campo. A parte aérea das plantas de cada cultivo foi coletada 45 dias após o plantio, seca, pesada, moída e analisada quanto a K, Ca e Mg. Para o K, a granulometria <0,85mm foi mais eficiente na disponibilidade para as plantas, mas não houve diferenças suficientes para definir a melhor granulometria quanto a cálcio e magnésio. No ensaio de incubação dos solos não houve alterações no pH e K.

**Palavras-chave:** *Glycine max.* *Zea mayz.* rochagem. fontes alternativas de nutrientes. aproveitamento de resíduos industriais. economia circular.

## **Agronomic efficiency of two particle sizes of a mining by-product for use as soil remineralizer**

### **ABSTRACT**

Nutrient depletion in soils threatens global food security and has been seriously underestimated, particularly for potassium (K). This is particularly the case in highly weathered soils in tropical countries, where mineral fertilizers are often poorly accessible. One way to replenish macro and micronutrients is through rock powders. The minerals that form rocks contain most of the essential nutrients for plants, but slow and inconsistent weathering rates have restricted their use in the past. Currently, the use of remineralizers is emerging as a possibility, since these inputs behave as a type of rejuvenator for poor or leached soils, where rock powder is used to replenish nutrients. In Brazil, a wide range of requirements are proposed to validate the use of rock powders in crops, ranging from the ability to improve plant growth to more strategic benefits. Therefore, this study aims to evaluate the agronomic efficiency of a rock powder in two particle sizes (<2.00 mm and <0.85 mm), six doses (0, 100, 200, 300, 400 and 500% of the K<sub>2</sub>O recommendation for corn and soybean crops) and two soils, for classification as a soil remineralizer. An incubation trial was carried out in a randomized block experimental design, with a 2\*6\*2 triple factorial arrangement, with five replicates. The powder was incubated for 150 days in 100 g portions of soil, with sampling at 7, 30, 60, 90, 120 and 150 days. An experiment in pots, in a greenhouse, was set up with the same particle sizes and doses and six successive crops of corn or soybean, in addition to treatments receiving KCl, considered as a reference source, at a dose equivalent to the recommended one. The pots received a single initial application of powder and fertilizer and water daily to maintain moisture at 80% of field capacity. The aerial parts of the plants of each crop were collected 45 days after planting, dried, weighed, ground and analyzed for K, Ca and Mg. For K, the particle size <0.85 mm was more efficient in availability to the plants, but there were not enough differences to define the best particle size for calcium and magnesium. In the soil incubation test, there were no changes in pH and K.

**Keywords:** *Glycine max.* *Zea mayz.* rock Dust. alternative sources of nutrients. use of industrial waste. circular economy.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Vasos plásticos utilizados para o experimento.....	22
<b>Figura 2</b> - Biomassa aérea de plantas de milho cultivadas com pó de rocha em duas granulometrias e a doses crescentes de pó de rocha.....	26
<b>Figura 3</b> - Massa seca das plantas de soja submetidas duas granulometrias e a doses crescentes de pó de rocha.....	27
<b>Figura 4</b> - Concentração de cálcio na matéria seca de plantas de soja submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.....	28
<b>Figura 5</b> - Concentração de cálcio na matéria seca de plantas de milho submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.....	29
<b>Figura 6</b> - Concentração de magnésio na matéria seca de plantas de soja submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.....	30
<b>Figura 7</b> - Concentração de magnésio na matéria seca de plantas de milho submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.....	31
<b>Figura 8</b> - Concentração de potássio na matéria seca de plantas de soja submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.....	32
<b>Figura 9</b> - Concentração de potássio na matéria seca de plantas de milho submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.....	33
<b>Figura 10</b> - Efeito da Granulometria e da Dose de Pó de Rocha na Eficiência Relativa de plantas de milho em Diferentes Solos.....	34
<b>Figura 11</b> - Efeito da Granulometria e da Dose de Pó de Rocha na Eficiência Relativa de plantas de soja em Diferentes Solos.....	35
<b>Figura 12</b> - pH dos solos em experimento de incubação submetido a duas granulometrias de pó de rocha em doses crescentes.....	37
<b>Figura 13</b> - Quantidades de K nos solos em experimento de incubação submetido a duas granulometrias de pó de rocha em doses crescentes.....	38

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Atributos químicos dos solos estudados.....	20
<b>Tabela 2</b> - Atributos físicos dos solos estudados.....	20

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Hipóteses.....	12
1.2. Objetivos.....	12
1.2.1. Objetivos gerais.....	12
1.2.2. Objetivos específicos.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3. METODOLOGIA.....	18
3.1. Caracterização do pó de rocha.....	18
3.2. Caracterização dos solos e das culturas utilizadas.....	19
3.3. Ensaio de incubação.....	21
3.4. Experimento em casa-de-vegetação.....	21
3.5. Análises em amostras de solo incubado com pó de rocha.....	23
3.6. Análises em amostras de plantas.....	23
3.7. Análises dos dados.....	24
4. RESULTADOS.....	25
4.1. Análise Mineralógica do pó de rocha.....	25
4.2. Massa seca da parte aérea.....	26
4.3. Concentração de cálcio no tecido vegetal das plantas.....	27
4.4. Concentração de magnésio no tecido vegetal das plantas.....	29
4.5. Concentração de Potássio no tecido vegetal das plantas.....	31
4.6. Índice de Eficiência Agronômica (IEA) do pó de rocha.....	34
4.7. Teste de incubação dos solos.....	36
5. CONCLUSÕES.....	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

## 1. INTRODUÇÃO

Um grande desafio na agricultura é aumentar ou manter os rendimentos sem degradar ainda mais os sistemas ambientais, especialmente os solos. A agricultura é uma importante força motriz da degradação de solos no mundo, que está progredindo em taxas alarmantes com milhões de hectares de terras agrícolas tornando-se improdutivas a cada ano. Ao mesmo tempo, existe uma quantidade limitada de terras agrícolas adicionais, os rendimentos das culturas apresentam uma tendência decrescente e a previsão é que a futura produção alimentar seja ainda mais limitada pelas alterações climáticas.

A situação é particularmente grave nos trópicos, o centro da insegurança alimentar global e do futuro crescimento populacional, onde mais de 40% dos solos são Latossolos e Argissolos com baixos teores de nutrientes. O manejo de solos tropicais é um desafio, uma vez que os fertilizantes solúveis NPK muitas vezes não são baratos ou acessíveis e não repõem as deficiências de micronutrientes. Portanto, encontrar maneiras sustentáveis de gerenciar solos tropicais é de importância crucial.

Entre os principais contribuintes para o aumento da produção agrícola estão os nutrientes minerais, que são extraídos do solo a cada colheita e devem ser adequadamente substituídos por fertilizantes. Em muitos países, porém, a produção alimentar atualmente depende do esgotamento de grandes quantidades de nutrientes minerais do solo sem substituição adequada, resultando em taxas globais substanciais de perda dos nutrientes dos solos cultivados.

No Brasil, utiliza-se prioritariamente fertilizantes químicos importados, visto que não há matéria prima nacional disponível para suprir a demanda . Dos produtos fabricados em território nacional, a maior concentração está na região Sul do país. Neste propósito, nos últimos anos, vários estudos têm buscado outras alternativas de fertilizantes disponíveis no território nacional com potencial de serem utilizadas para o fornecimento de nutrientes para as culturas.

Em 2023, foram utilizadas mais de 45 milhões de toneladas de fertilizantes no Brasil, das quais 70% foram importadas segundo a ANDA (Associação Nacional de Difusão de Adubos). É neste cenário, de aumento das demandas pelo crescimento da agricultura, bem

como pela preocupação cada vez maior com o desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção, que surgem novas oportunidades a partir do aproveitamento de coprodutos de processos agroindustriais.

Uma forma de melhorar o crescimento das plantas e simultaneamente melhorar os solos é a utilização de rochas moídas. A alteração dos solos com rochas moídas é uma prática antiga e a sua utilização é comum na agricultura, como, por exemplo, rochas carbonadas (calcário) e sulfatadas (gesso) para calagem e rochas fosfáticas (apatita) como fertilizantes fosfatados. Fontes alternativas de insumos como os remineralizadores têm demonstrado alto potencial na recuperação dos índices de fertilidade, principalmente como fontes alternativas de potássio ( $K^+$ ). Algumas rochas, como as ultramáficas alcalinas, os flogopititos, brechas piroclásticas, xistos, biotitas e basaltos têm se mostrado promissoras no fornecimento e prontamente disponíveis já que a maioria dos solos brasileiros apresenta deficiência no uso deste nutriente.

Os pós de rocha referidos como finos minerais são, em muitos casos, considerados resíduos pelas indústrias de extração. Eles são constituídos por uma variedade de materiais naturais, alguns dos quais são verdadeiros resíduos, enquanto outros são produtos fabricados especificamente para um determinado padrão. Em alguns casos, o termo também é aplicado a outros materiais reciclados, por exemplo, das indústrias de construção/demolição. O uso de pó de rocha como meio de aumentar o crescimento das plantas e, portanto, a qualidade das culturas, através da melhoria dos solos em que crescem, foi proposto por vários grupos de pesquisa. Uma ampla gama de exigências são propostas para validar a recomendação de utilização de pós de rocha em cultivos, que vão desde a capacidade de melhoria do crescimento da planta até benefícios mais estratégicos, principalmente por meio do aumento do sequestro de carbono no solo. A utilização de resíduos de mineração com potencial agrícola, atualmente denominados de co-produtos, também representa uma contribuição para amenizar o aquecimento global e seus efeitos. Os benefícios da aplicação de pós de rocha não são amplamente aceitos; porém, se validados por evidências técnicas e científicas robustas, podem representar uma ferramenta potencialmente poderosa para influenciar positivamente a mudança ambiental global.

O basalto é uma rocha silicatada que apresenta ampla distribuição nas regiões sul e

sudeste do Brasil e um bom potencial de uso agrícola. Alguns trabalhos têm demonstrado que a aplicação do pó de basalto melhora as características químicas do solo, disponibilizando elementos como P, K, Ca e Mg, além da redução do Al trocável, correção da acidez e aumento da CTC do solo.

O processo de remineralização fornece macro e micronutrientes para as plantas, com exceção do N. A maior parte dos fertilizantes potássicos utilizados no Brasil é importada, principalmente da Rússia e do Canadá, e o mais comum é o cloreto de potássio (KCl, 58% de K<sub>2</sub>O). Assim, a possibilidade de fornecer potássio por meio da aplicação de pó de rocha merece atenção. Mesmo com os incentivos à produção de fertilizantes, nos anos 1980, a produção nacional de fertilizantes potássicos atende apenas 3,6% da demanda, o que requer fontes alternativas.

Objetivou-se com o presente estudo avaliar a eficiência agrônômica de um pó de rocha de basalto produzido na cidade de Alegrete, Rio Grande do Sul, para classificação como remineralizador de solo. Os experimentos tiveram duração de 270 dias e foram conduzidos nas dependências do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

## **1.1. Hipóteses**

Ao longo de seis ciclos de plantio após aplicação do pó de rocha, haverá aumento gradual no pH e nutrientes no solo e na massa vegetal de milho e soja cultivados em casa de vegetação.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos gerais**

O objetivo geral do projeto é avaliar a eficiência agrônômica de um pó de rocha, resultante da fabricação de brita, como fonte de K, Ca e Mg, em duas granulometrias (<2,00mm e <0,85mm) para classificação como remineralizador de solo.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- 1 - Determinar a reatividade (liberação dos nutrientes para a solução do solo) em diferentes doses do pó de rocha nas duas granulometrias em dois solos diferentes.
- 2 - Testar a capacidade do pó de rocha de atuar diretamente na nutrição e/ou desenvolvimento de duas espécies de plantas, ou, indiretamente, por meio da melhoria de características do solo, em experimento de casa-de-vegetação.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Os silicatos que formam as rochas são os tipos de minerais mais comuns na Terra e contém os elementos essenciais para o crescimento das plantas, excluindo o N (DEER et al. 2013). O processo geoquímico fundamental que molda o meio ambiente do planeta é a liberação de elementos por meio do intemperismo, que também é a principal fonte de nutrientes para o solo (SCHLESINGER; BERNHARDT, 2013). Pós de rochas silicatadas foram propostos como fertilizantes de liberação lenta e corretivos do solo (FYFE et al. 2006).

O uso de pó de rocha traz benefícios para o solo, como o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e do pH, diminuição de alumínio trocável, fornecimento de macronutrientes (em especial o potássio) e micronutrientes, também contribuindo para melhorias em sua estrutura. É aplicado em olericultura, fruticultura, cana de açúcar, cereais, setor florestal e pastagens, em substituição e/ou complementação aos fertilizantes industrializados. Sua eficiência agrônômica depende de fatores como mineralogia, composição química e granulometria das rochas moídas, condições de clima e de solo e a atividade microbiana (SWOBODA et al., 2022).

A investigação sobre os pós de rocha ainda é limitada, dispersa e parcialmente contraditória, com resultados que vão desde aumentos significativos no rendimento e melhorias para o solo até nenhum benefício (HARLEY; GILKES, 2000; VAN STRAATEN, 2007). As variações nas pesquisas com remineralizadores estão ligadas à complexidade do processo de intemperismo das rochas, que depende de uma série de fatores.

O intemperismo e, portanto, a eficiência dos remineralizadores, dependente de uma

complexa interação de diversos fatores relevantes, como solo, planta e rocha/mineral, tamanho de partícula de rocha, quantidade de aplicação e duração do estudo (BAMBERG et al., 2017).

Nos últimos anos, os remineralizadores têm recebido um interesse renovado de diversas direções. Em ambientes tropicais, resultados benéficos têm-se acumulado, principalmente no Brasil, centro das pesquisas e onde o movimento Rochagem ajudou a institucionalizar o uso de pós de rocha na agricultura (MANNING; THEODORO, 2020).

Desta forma, a utilização de pó de rochas ou rochagem, apesar de não ser um conceito novo, tem sido objeto de pesquisas oficiais e de portfólios de empresas, principalmente depois que o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), através da Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013 e a Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016, regulamentaram a produção, registro e comércio dos pós de rocha na agricultura. Atualmente chamados de "Remineralizadores", o material deve ter origem mineral, passado apenas por redução e classificação de tamanho por processos mecânicos, e deve alterar os índices de fertilidade do solo, adicionando macro e micronutrientes para as plantas e promovendo a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas e/ou da atividade biológica do solo, e com quantidades de contaminantes como arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb). (BRASIL, 2016) abaixo do permitido.

De acordo com o Art. 4º da IN 05/2016 (BRASIL, 2016), os remineralizadores deverão apresentar as seguintes especificações e garantias mínimas:

- I. Em relação à soma de bases (CaO, MgO, K<sub>2</sub>O), deve ser igual ou superior a 9% (nove por cento) em peso/peso;
- II. Em relação ao teor de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), deve ser igual ou superior a 1% (um por cento) em peso/peso;
- III. Em relação ao potencial hidrogeniônico (pH) de abrasão, valor conforme declarado pelo registrante.

Segundo o Art. 9º da IN 05/2016 (BRASIL, 2016), para o registro de remineralizadores, considera-se:

- I. Para os materiais de origem mineral que já foram submetidos a testes

agronômicos e tiveram seu uso na agricultura aprovados pela pesquisa brasileira oficial ou credenciada em data anterior a publicação desta Instrução Normativa, uma vez atendido o disposto no Art. 4º desta Instrução Normativa e, em se tratando de produto de mesmo material e mesma região geográfica dos materiais de origem mineral testados, o registro foi concedido mediante a apresentação dos referidos trabalhos científicos pelo requerente, os quais devem ser conclusivos quanto à eficiência agrônômica;

- II. Para os produtos que não foram testados pela pesquisa brasileira, sem prejuízo do disposto no Art. 4º desta Instrução Normativa, o registro somente será concedido após a realização de ensaios agrônômicos por instituições oficial ou credenciada de pesquisa, conduzidos com plantas e obrigatoriamente em casa de vegetação ou a campo, podendo esses ensaios ser complementados com testes de incubação ou em colunas de lixiviação, que demonstrem de forma conclusiva que o produto se presta ao fim a que se destina;
- III. Trabalhos científicos conclusivos realizados por instituições de pesquisa brasileira, oficial ou credenciada pelo MAPA, que demonstrem, de forma inequívoca, a eficiência agrônômica do produto objeto do pedido de registro.

Um grande desafio para as pesquisas é que em muitos estudos os nomes das rochas são incorretos e, portanto, os experimentos são difíceis de repetir. Muitos estudos são liderados por cientistas agrícolas que muitas vezes não estão cientes do rigor e complexidade envolvidos na nomeação de rochas (GLAZNER et al., 2019). Proprietários de pedreiras raramente usam o nome correto do material e, em vez disso, usam nomes que representam o uso habitual em seus mercados de construção.

As taxas de dissolução para remineralizadores são desafiadoras, uma vez que as rochas são normalmente compostas por mais de um mineral, portanto, as taxas de dissolução em massa precisam considerar todos os minerais, seu intercrescimento dentro da rocha e sua textura (MANNING; THEODORO, 2020). O tamanho das partículas da rocha também influencia as taxas de intemperismo, uma vez que está relacionado com a área de superfície reativa, que aumenta com a diminuição do tamanho das partículas. Vários ensaios demonstraram que a diminuição do tamanho das partículas aumentou a solubilidade. Taxas

de intemperismo convergentes foram relatadas para diversas rochas, com taxas de dissolução inicialmente mais altas para partículas mais finas (BASAK et al., 2018).

Diversos estudos estão sendo conduzidos usando rejeitos de mineração como matéria-prima, devido ao seu potencial como remineralizador do solo. Para coletar os dados necessários, são imprescindíveis ensaios agrícolas, além de uma análise detalhada da composição química e mineralógica da rocha empregada. (KORCHAGIN, 2018).

Não só a granulometria da rocha pode influenciar nas taxas de intemperismo, como também a espécie cultivada no solo. As plantas influenciam a condição biológica e física do solo, particularmente na rizosfera, onde as condições podem diferir muito daquelas do solo. A temperatura, o pH, os níveis de umidade, as concentrações elementares e gasosas flutuam nessas áreas e, assim, alteram a taxa no equilíbrio das reações entre a fase mineral sólida e a solução do solo (MARSCHNER, 2002). Zou et al. (2019) relataram taxas de intemperismo mais altas com o cultivo de soja (*Glycine max*) que no de milho (*Zea mays*), o que foi associado à liberação adicional de  $H^+$  durante a fixação de N de rizóbios associados a leguminosas.

A influência das raízes das plantas no intemperismo também está relacionada com a sua morfologia e simbiose com fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Foi demonstrado que a presença de FMA aumenta adicionalmente o intemperismo, com mudas de “buffalo grass” ou grama azul (*Bouteloua dactyloides*), espécie norte-americana nativa do Canadá, México e Estados Unidos (BURGHELEA et al., 2018; VERBRUGGEN et al., 2021).

Quanto aos fatores climáticos que influenciam o intemperismo das rochas, os principais são a precipitação e a temperatura. Estudos realizados por Sanchez (2019) confirmaram a dependência da temperatura na dissolução mineral em vários climas tropicais. A precipitação, por sua vez, é crucial, uma vez que a água é fundamental para todas as formas de intemperismo químico no solo e porque um elevado fluxo de água promove uma solução do solo que está em desequilíbrio iônico com a superfície mineral, promovendo assim o intemperismo (WEIL; BRADY, 2017). O uso dos remineralizadores é, portanto, particularmente adequado para condições climáticas úmidas e sub úmidas predominantes nos trópicos, mas também tem importância potencial em regiões semiáridas, devido a ocorrência de altas temperaturas, principalmente, mas não só, em áreas irrigadas.

O basalto tem sido o foco de inúmeros estudos de longo prazo sobre a fertilidade do solo e pode apresentar resultados distintos a depender do solo utilizado, do basalto empregado e da cultura semeada (LEWIS et al., 2021; LUCHESE et al., 2023b).

Nesse contexto, Fonseca (2011) testou doses crescentes de pó de basalto em dois Latossolos Distroféricos Vermelhos sendo um de textura argilosa e outro de textura média e constatou que houve melhora significativa nos atributos químicos do solo de textura média, enquanto que, o solo de textura argilosa por apresentar maior fertilidade natural não apresentou respostas significativas para a maioria dos atributos químicos do solo. Isso mostra que diferentes texturas do solo e principalmente sua fertilidade natural podem ter, nesses casos, um comportamento diferente em relação a resposta da aplicação de pó de basalto.

Conforme Schmidt et al. (2019), a substituição completa de fertilizantes químicos solúveis por pó de rocha não modificou os atributos químicos do solo. Contudo, os autores observaram um efeito positivo nos componentes de produção, notando um aumento no número de vagens com três grãos nos tratamentos que receberam  $2 \text{ t/ha}^{-1}$  de uma mistura de granito, mármore dolomítico e basalto, em comparação com a soja sem fertilização.

Comparados aos fertilizantes solúveis, os remineralizadores são insumos de liberação lenta e corretivos de solos com potenciais efeitos em médio e longo prazo. Evidências de melhorias a longo prazo com pó de rocha podem ser extraídas de testes florestais, normalmente variando de vários anos a várias décadas. Aplicações únicas de calcário dolomítico ( $22,4 \text{ t/ha}^{-1}$ ) melhoraram o pH do solo e cátions básicos trocáveis em vários solos florestais ácidos por até 15 anos (TAYLOR et al. 2021). Da mesma forma, uma única aplicação de biotita misturada com apatita aumentou os teores totais de Mg, K e P em um Espodossolo por até 10 anos, embora os efeitos incipientes no pH do solo só tenham começado após 2 anos (AARNIO et al. 2003).

A baixa taxa de dissolução de muitas rochas é um grande obstáculo aos remineralizadores, que poderia ser superado por modificações físicas, químicas ou biológicas. As modificações físicas incluem vários métodos de moagem para diminuir o tamanho das partículas, o que leva a uma redução considerável no tempo de dissolução (KLEIV; THORNHILL, 2007). As modificações biológicas têm sido as mais pesquisadas e envolvem a mistura de pós de rocha com microrganismos solubilizadores de silicato ou

materiais orgânicos, como esterco. Ensaios de Ribeiro et al. (2020) demonstraram que as bactérias solubilizadoras de silicato são capazes de aumentar substancialmente a liberação de nutrientes dos minerais. Existem evidências contrastantes de que o próprio processo de compostagem pode aumentar o desgaste das rochas através de ácidos orgânicos produzidos microbiologicamente, temperaturas elevadas e concentrações aumentadas de CO<sub>2</sub> (LI et al. 2020; TAVARES et al. 2018).

A utilização de remineralizadores pode contribuir para diminuir a dependência de insumos externos e melhorar a eficácia na manutenção da fertilidade do solo através da lenta e gradual redução do uso de fertilizantes industriais, em manejos que permitem o incremento de matéria orgânica no solo e promovem condições favoráveis para a sobrevivência e estabelecimento de microrganismos do solo em geral. (EDWARD, et al., 2016).

Segundo Alovisi et al. (2020), a baixa solubilidade do pó de basalto sugere que ele não pode ser usado como principal fonte de nutrientes para as plantas, mas pode ser considerado uma fonte alternativa de fertilizantes e corretivos de baixo custo.

### **3.METODOLOGIA**

Neste projeto foi seguida a metodologia descrita no “Protocolo para Avaliação da Eficiência Agrônômica de Remineralizadores de Solo” (EMBRAPA 2019), com modificações. O protocolo recomenda a realização de ensaios de incubação e ensaios com cultivo de culturas de interesse, em condições controladas.

#### **3.1.Caracterização do pó de rocha**

O pó de rocha testado provem de uma industria mineradora de brita para construção civil, localizada na cidade de alegrete no Rio Grande do Sul a latitude 29° 47' 5'' S e a uma longitude 55° 46' 33'' O. Foram testadas as granulometrias < 2,00mm e < 0,85mm.

As análises físico-químicas do pó de rocha foram executadas e/ou acompanhadas pela empresa Reminera Soluções em Geologia e Meio Ambiente LTDA (registrada no MAPA sob N° PE-00827). As análises seguiram as especificações e garantias para registro de remineralizador de solo no Brasil, estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária

(MAPA) por meio da Instrução Normativa N° 5, de 10 de março de 2016.

Para a descrição petrográfica, foi confeccionada uma seção delgada (tamanho 5,5 x 2,5 cm) de rocha cominuída, pelo método de impregnação com resina. A seção foi analisada em microscópio petrográfico Zeiss Scope.A1 do Laboratório de Petrologia Sedimentar (LPS/LAGESE/LITPEG/UFPE). A análise modal incluiu a contagem de 1000 pontos distribuídos regularmente com auxílio de um charriot de passo acoplado ao microscópio.

Para especificação de natureza física/análise granulométrica, foram utilizadas as peneiras 4,75 mm (ABNT n° 4), 2,36 mm (ABNT n° 7), 2,00 mm (ABNT n° 10), 0,85 mm (ABNT n° 20) e 0,30 mm (ABNT n° 50), e balança de precisão. A peneira 2,36 mm (ABNT n° 7) foi utilizada no lugar da peneira 2,80 mm (ABNT n° 8), sem prejuízo quanto à avaliação da respectiva garantia granulométrica.

Para análise do pH de abrasão da amostra, foi utilizado o medidor de pH de bolso AKSO AK-90 (resolução de 0,1; exatidão de  $\pm 0,1$ ). A análise seguiu o método proposto por Grant (1969).

Para as análise geoquímicas, foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Após quartejamento manual, a amostra foi secada em estufa a 110°C. Uma porção de amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força.

As concentrações dos elementos potencialmente tóxicos (EPT's) arsênio (As) e cádmio (Cd) foram analisados pelo método de espectrometria de emissão óptica / US EPA Method 200.7; chumbo (Pb) foi analisado por fluorescência de raios-x; e mercúrio (Hg) foi analisado com o analisador Direto de mercúrio – DMA / US EPA Method 7473-3.

### **3.2.Caracterização dos solos e das culturas utilizadas**

Foram utilizados solos com texturas contrastantes, conforme recomendação do “Protocolo para Avaliação da Eficiência Agronômica de Remineralizadores de Solo” (EMBRAPA 2019), coletados nos municípios de Belo Jardim (8°19’11.93”S e 36°25’04.76”O) e Goiana (7°34’09.6”S e 35°01’40.51”O), ambos no estado de Pernambuco.

As amostras foram coletadas da camada superficial (0 a 0.20m), passadas em peneiras de 2 mm e em seguida, subamostras foram retiradas

para determinação dos atributos químicos (Tabela 1) e físicos (Tabela 2), de acordo com metodologias sugeridas em Embrapa (2017): pH em água (proporção solo:água de 1:2,5); sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e fósforo (P) foram extraídos com solução Mehlich-1 e dosados por fotometria de emissão de chama ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e colorimetria (P); cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) foram extraídos com KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$  e dosados por titulometria; a acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e dosada por titulometria (Tabela 1). As proporções de areia, silte e argila foram determinadas pelo método da pipeta; a densidade do solo (Ds), pelo método da proveta; a densidade de partículas (Dp), pelo método do balão volumétrico (Tabela 2).

**Tabela 1** – Atributos químicos dos solos estudados.

LOCAL	P	pH	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	CTC	V	m
	mg/dm <sup>3</sup>	(H <sub>2</sub> O)	cmolc/dm <sup>3</sup>									%
Goiana	4	4,5	0,35	0,65	0,02	0,03	0,9	5,45	1,1	7,4	14	46
Belo Jardim	129	6,7	4,5	1,25	0,13	0,7	0	1,89	6,6	8,5	78	0

**Tabela 2** - Atributos físicos dos solos estudados.

LOCAL	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )		Composição granulométrica (%)			
	Dap	Dr	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
Goiana	1,48	2,59	59	31	2	8
Belo Jardim	1,3	2,56	39	19	18	24

O solo do município de Goiana é classificado como Espodossolo ferrihumilúvico, enquanto que o solo de Belo Jardim é um Neossolo Regolítico.

As culturas selecionadas para os testes em casa-de-vegetação foram o milho e a soja, por suas características contrastantes (uma gramínea e uma leguminosa), conforme recomendação do Manual . Além disso, são culturas de grande importância para o país e por serem cultivadas em grandes áreas de diferentes regiões.

A variedade de milho utilizada para o experimento foi a CMS-36, desenvolvida pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), com o intuito de ter uma boa produtividade em

solos ácidos da região da Chapada do Araripe. Para a soja foi utilizada a variedade FTR 3191 IPRO, uma das variedades mais usadas no norte e nordeste do Brasil por sua rusticidade e excelente sanidade radicular.

### **3.3. Ensaio de incubação**

Um ensaio de incubação foi feito em um delineamento experimental em blocos casualizados, com arranjo fatorial triplo  $2 \times 6 \times 2$ , com cinco repetições, totalizando 120 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram nas duas granulometrias do pó de rocha ( $< 2,00\text{mm}$  e  $< 0,85\text{mm}$ ), que foram misturadas, em seis doses crescentes (0, 100, 200, 300, 400 e 500% da recomendação para cada cultura), com os dois solos estudados. As doses foram definidas de acordo com o manual “Recomendações de adubações para o estado de Pernambuco - 2a. aproximação” (CAVALCANTI, 2008) e são equivalentes a 80, 160, 240, 320 e 400 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$  para o milho; e 60, 120, 180, 240 e 300 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$  para a soja, respectivamente. Amostras de 2 kg de solo foram homogeneizadas com suas respectivas doses de pó de rocha e mantidas com umidade de 80% da capacidade de campo usando água destilada.

Amostras de 2 kg de solo foram homogeneizadas com suas respectivas doses de pó de rocha e incubadas por 150 dias, mantidas com umidade de 80% da capacidade de campo usando água destilada. Amostras de 100 g foram coletadas aos 7, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de incubação, secas ao ar e preparadas para as análises de pH e K, utilizando as mesmas metodologias utilizadas para a caracterização dos solos, conforme recomendação da Embrapa (2019).

### **3.4. Experimento em casa-de-vegetação**

Dois experimentos em casa de vegetação foram montados utilizando as mesmas granulometrias e doses do pó de rocha e os mesmos solos testadas no ensaio de incubação. Um experimento utilizou a soja (*Glycine max* (L) Merrill) como planta teste e o outro o milho (*Zea mays* L.). Cada unidade experimental foi representada por um vaso de plástico com capacidade de 3 litros (Figura 2). Foram usados 120 vasos para cada cultura. O delineamento foi em blocos casualizados com 5 repetições, com arranjo fatorial  $2 \times 6 \times 2$ . Vasos

extras recebendo KCl, considerado como fonte referência, em dose equivalente à 100% da recomendação para cada cultura, foram adicionados e usados como uma testemunha positiva em cada bloco.

**Figura 1:** Vasos plásticos utilizados para o experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As quantidades de pó de rocha referentes a cada dose foram adicionadas aos seus respectivos vasos preenchidos com solo e homogeneizadas. Em seguida os vasos foram umedecidos para semeadura. Nos vasos assim preparados, foram realizados oito ciclos de cultivo sucessivos de 45 dias de cada cultura, totalizando 270 dias de avaliação. A seleção e um desbaste foram realizados no 10º dia após a emergência, deixando uma plântula por vaso.

Com o objetivo de suprir a deficiência de N e P , foram realizadas adubações utilizando ureia como fonte de N (apenas para o milho) e superfosfato simples como fonte de P (milho e soja), de acordo com CAVALCANTI (2008). A aplicação de água foi realizada diariamente, em quantidade necessária para manter a umidade em torno de 80% da capacidade de campo.

Aos 45 dias após o plantio das sementes, foi realizada medição da altura das plantas, tanto de milho quanto de soja e, em seguida, as partes aéreas das plantas foram cortadas rente ao solo, acondicionadas em sacos de papel e identificadas. As plantas foram secas em estufa

a 65 °C por 72 horas e pesadas para obtenção da matéria seca da parte aérea. Após pesagem, foram moídas, armazenadas em sacos plásticos e reservadas para digestão e análises laboratoriais. Após a coleta das plantas, foram realizadas novas semeaduras, utilizando os mesmos vasos contendo os solos com as diferentes doses do pó de rocha, sucessivamente até completar os 6 ciclos de avaliação. Esses cultivos foram realizados utilizando os mesmos procedimentos experimentais.

### **3.5. Análises em amostras de solo incubado com pó de rocha**

As amostras de solo foram analisadas quanto ao pH e aos teores trocáveis de  $K^+$  de acordo com metodologias descritas em Embrapa (2017). A medição eletroquímica da concentração efetiva dos íons  $H^+$  na solução do solo foi feita por meio de eletrodo combinado, imerso em suspensão solo/água na proporção de 1:2,5. Foram pesados 10 g de terra fina seca ao ar (TFSA) em copo plástico e adicionados 25 ml de água destilada; o material foi misturado com bastão individual e deixado em repouso por uma hora. Após esse período, a mistura foi agitada novamente com bastão e o eletrodo colocado na suspensão homogeneizada para efetuar a leitura do pH.

Realizou-se a extração do K no solo utilizando uma solução extratora duplo-ácida (Mehlich 1), constituída por uma mistura de ácido clorídrico e ácido sulfúrico. Foram pesados 10 g de TFSA e colocados em Erlenmeyer de 125 ml, e adicionados 100 ml da solução extratora duplo-ácida; essa mistura foi levada para agitação durante 5 minutos em agitador horizontal. Em seguida, o material foi deixado em repouso durante uma noite para decantação (16 h). O extrato foi filtrado e reservado para determinação em fotômetro de chama.

### **3.6. Análises em amostras de plantas**

Amostras de 0,5 g da biomassa aérea de todas as plantas coletadas foram pesadas, colocadas em tubo digestor de 80 ml e levadas para digestão. O extrato resultante da digestão foi armazenado para determinação das concentrações totais de Ca, Mg e K no tecido vegetal, de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (2017).

Realizou-se uma digestão úmida em sistema aberto usando bloco digestor como fonte

de calor e solução nitro-perclórica ( $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ ) para digerir a matéria seca. Foram adicionados 8 ml da solução ácida aos tubos, que foram levados para o bloco digestor. O bloco foi ajustado para atingir a temperatura de 120 °C e os tubos permaneceram aquecendo por aproximadamente 1 hora, até cessar o desprendimento do vapor castanho de  $\text{NO}_2$ . Em seguida, a temperatura foi elevada a 200 °C e mantida até cessar o desprendimento do vapor branco de  $\text{HClO}_4$ , resultando em um tempo de 4 horas no bloco digestor. Para cada bateria de amostras, foi realizada uma prova em branco adotando os mesmos procedimentos das demais amostras, excluindo-se apenas a colocação da matéria seca para digestão. Após a digestão, as amostras foram esfriadas e, na sequência, transferidas para balão volumétrico de 25 ml e o volume completado com água destilada. Os extratos foram armazenados em frascos de 50 ml. As leituras de Ca e Mg foram feitas em absorção atômica e as de K em fotômetro de chama.

As quantidades acumuladas dos nutrientes no tecido vegetal das plantas de milho e soja foram calculadas por meio do produto das concentrações de K, Ca e Mg e suas respectivas biomassas. A extração total dos nutrientes nos ciclos sucessivos foi calculada pela soma das quantidades acumuladas em cada ciclo.

A eficiência de utilização de nutrientes do pó de rocha foi estimada através do Índice de Eficiência Agronômica (IEA), que corresponde ao quociente dos rendimentos obtidos com o pó de rocha e o rendimento obtido com a fonte de referência (KCl):

$$\text{EU}\% = 100 * (\text{R}_{(\text{pó de rocha})} / \text{R}_{(\text{fonte referência})})$$

Em que EU% é a eficiência de utilização do K;  $\text{R}_{(\text{pó de rocha})}$  é o parâmetro (biomassa, concentração e acúmulo do nutriente) avaliado no milho ou na soja cultivados recebendo as diferentes doses de pó de rocha; e  $\text{R}_{(\text{fonte referência})}$  é o parâmetro (biomassa, Concentração e acúmulo do nutriente) avaliado no milho ou na soja cultivados recebendo KCl.

### **3.7. Análises dos dados**

As análises de variância foram feitas utilizando o pacote “easyanova” (ARNHOLD, 2013) na linguagem R (R CORE TEAM, 2023). Os testes de Shapiro-Wilk e Levene foram conduzidos para avaliação da distribuição normal dos erros e homogeneidade de variâncias,

respectivamente. Os modelos de regressão linear foram feitos utilizando-se a função “lm()” do pacote “lme4” (BATES et al., 2015). Os Figuras foram montados utilizando-se o pacote “ggplot2” (WICKHAM, 2016). O teste de comparação de médias utilizado para comparar as granulometrias em um mesmo solo, ciclo e cultura e foi o teste t ( $p > 0,05$ ) através do pacote “ggpubr” (KASSAMBARA, 2023).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análise Mineralógica do pó de rocha

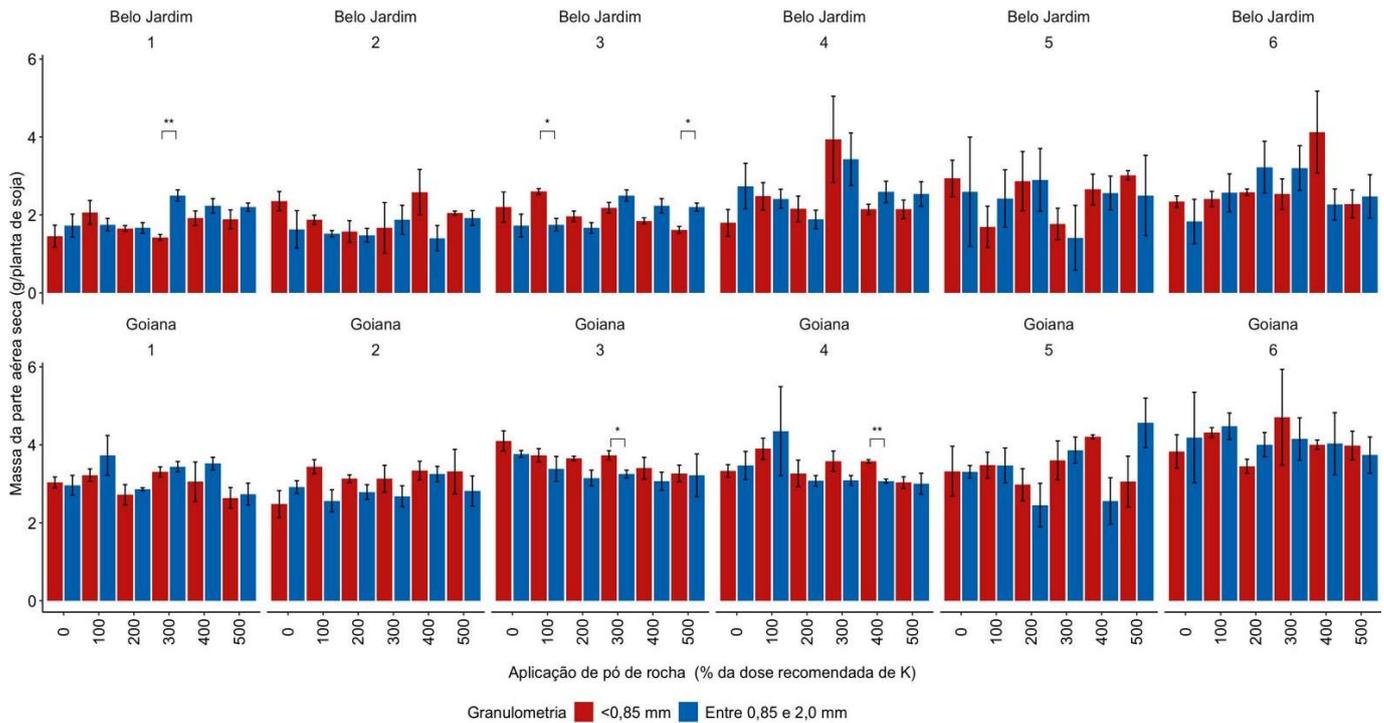
O pó de rocha utilizado para os testes é classificado como basalto, com mineralogia de 71,6 % de plagioclásio, 17% de clinopiroxênio, 6,8% de minerais opacos, 4,6% de óxidos-hidroxidos de Fe e <0,1% de quartzo (determinada por petrografia com contagem modal de 500 pontos). Apresenta a seguinte composição química (%): 2,94 de Na<sub>2</sub>O; 1,24 de MgO; 12,16 de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 50,89 de SiO<sub>2</sub>; 0,66 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,02 de SO<sub>3</sub>; 0,01 de Cl; 2,79 de K<sub>2</sub>O; 6,27 de CaO; 1,40 de TiO<sub>2</sub>; 0,06 de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,17 de MnO; 11,06 de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>T; 0,01 de Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,01 de CuO; 0,01 de ZnO; 0,01 de Rb<sub>2</sub>O; 0,02 de SrO; 0,02 de ZrO<sub>2</sub>; 0,07 de BaO; 10,15 de PF (precisa definir o que é) (determinados por fluorescência de Raios-X; equipamento Rigaku modelo ZSX Primus II). As concentrações de elementos tóxicos são (ppm): < 20 de As; < 0,001 de Cd; < 20 Pb 0,025 (determinados pela USEPA 3051 A e 6010) e < 0,025 de Hg (USEPA 7473). O pH de abrasão é de 9,0 (GRANT, 1969).

O teor de sílica livre (quartzo) do pó de rocha perfaz <0,1%, muito abaixo do limite máximo de 25% determinado pela Instrução Normativa 5 do MAPA (BRASIL, 2016).

Pode-se verificar que os elementos potencialmente tóxicos do basalto estão em níveis abaixo dos limites máximos permitidos pela IN 5/2016 do MAPA (arsênio - As, <15 ppm; cádmio – Cd, <10 ppm; chumbo – Pb, <200 ppm; mercúrio – Hg, <0,1 ppm) para remineralizadores de solos. (O de arsênio pode estar acima (<20 vs <15).

## 4.2. Massa seca da parte aérea

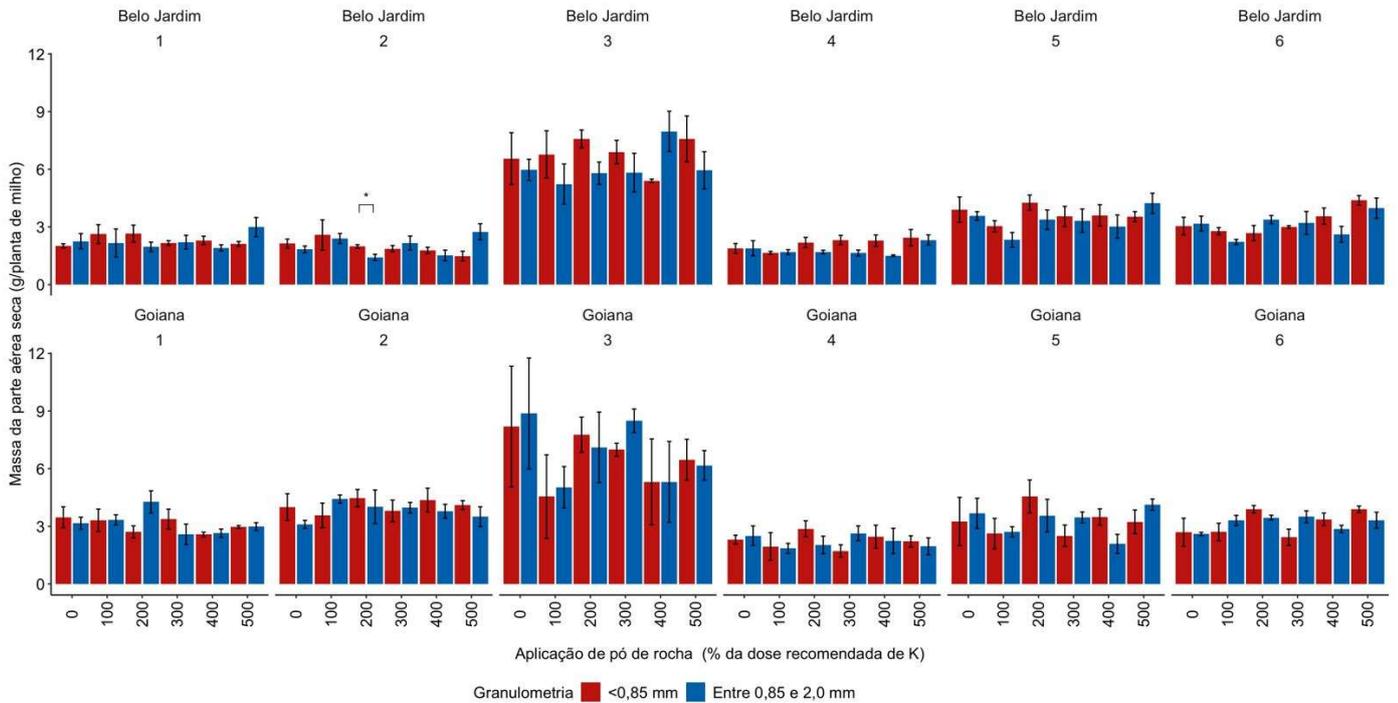
**Figura 2:** Biomassa aérea de plantas de soja cultivadas com pó de recha em duas granulometrias e a doses crescentes de pó de rocha.



Em geral, as duas granulometrias do pó de rocha não tiveram efeito consistente na biomassa aérea nos dois primeiros ciclos de cultivo, seja para o milho ou para a soja no solo de Belo Jardim (Figura 1). No solo de Goiana, houve efeito significativo quanto a granulometria para o milho do segundo ciclo e para a soja no primeiro ciclo. Estes efeitos significativos são mostrados em granulometrias diferentes, o que inicialmente não mostram um resultado concreto.

Poucas referências foram encontradas sobre as características agronômicas nas culturas da soja e milho em função de doses crescentes e granulometrias de pó de rocha “rochagem”. Diante disto, novos trabalhos devem ser feitos na mesma linha de raciocínio em ciclos consecutivos para dar maior consistência aos resultados obtidos.

**Figura 3:** Massa seca das plantas de milho submetidas duas granulometrias e a doses crescentes de pó de rocha.



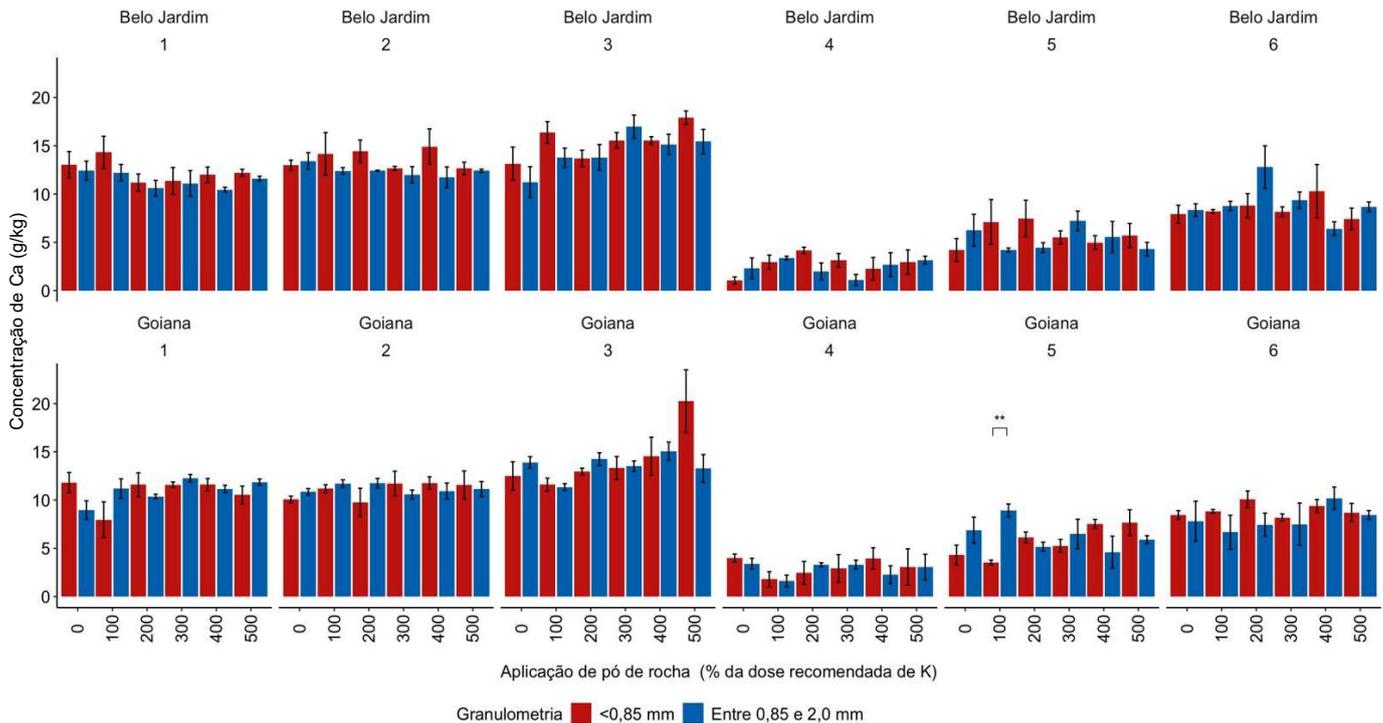
Em relação aos solos, houve uma nítida diferença quanto à biomassa aérea. Como o solo de Goiana é mais pobre em nutrientes que o de Belo Jardim, respostas maiores à aplicação do pó eram esperadas nos ciclos iniciais do experimento. A falta de resposta nos primeiros ciclos pode indicar que o pó de rocha teve pouco tempo para a liberação de nutrientes. (RAMOS et al., 2022).

#### 4.3. Concentração de cálcio no tecido vegetal das plantas

A variação na concentração de cálcio nos diferentes tratamentos e ciclos foi relativamente pequena (Figura 3), sugerindo que a aplicação de pó de rocha, nas doses e granulometrias testadas não teve efeito significativo. Entretanto, houve uma tendência positiva no uso do remineralizador ao longo dos ciclos, principalmente no solo de Goiana. As concentrações na soja foram, em geral, maiores do que no milho (3,5 a 20 mg g<sup>-1</sup> para a soja e 4,4 a 6,2 mg g<sup>-1</sup> para o milho). Essa diferença está relacionada às diferentes exigências nutricionais das duas culturas, sendo as concentrações consideradas médias (GOTT et

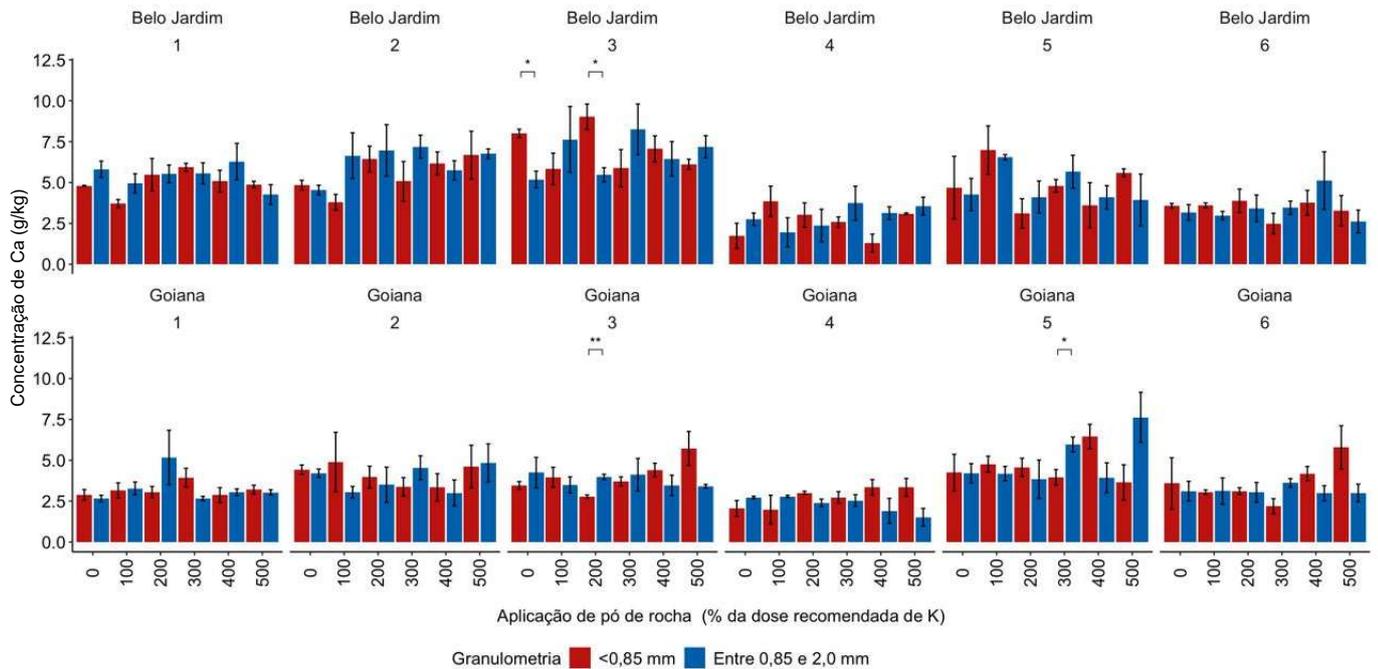
al.,2014).

**Figura 4:** Concentração de cálcio na matéria seca de plantas de soja submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.



A partir do 3º ciclo houve a aplicação de fertilizantes solúveis (N e P) No 4º ciclo observa-se que houve uma redução significativa na Concentração de cálcio em ambas as culturas e solos. Isso pode estar relacionado a diferentes fatores, como interação com outros elementos e alterações nas propriedades do solo. O fertilizante a base de fósforo pode interagir com o  $\text{Ca}^{2+}$  para formar precipitações de fosfato (por exemplo, fosfato de cálcio) o que reduz a absorção de Ca e P pelas plantas (HAYNES, 1985).

**Figura 5:** Concentração de cálcio na matéria seca de plantas de milho submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.



Também houve pouca variação na absorção de cálcio em função da dose de pó de rocha aplicada (Figura 4). No entanto, no solo de Belo Jardim, no 3º ciclo de cultivo e com a dose de 200%, as Concentrações de Ca foram maiores com a granulometria  $<0,85\text{mm}$ . No solo Goiana, houve um comportamento diferente: no 3º ciclo e na dose de 200%, os teores foram significativamente menores com a granulometria  $<0,85\text{mm}$ , o que foi repetido no 5º ciclo e na dose de 300%.

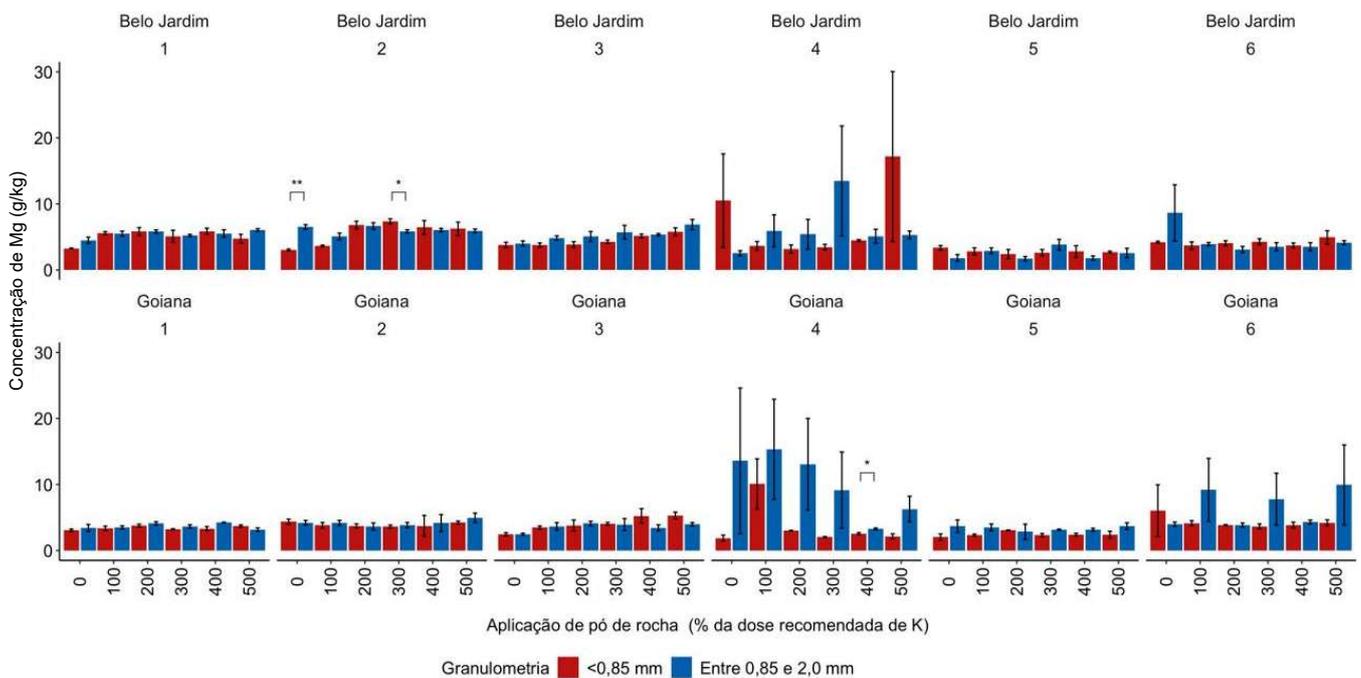
#### 4.4. Concentração de magnésio no tecido vegetal das plantas

A maioria dos efeitos causados pela aplicação de diferentes granulometrias e de doses crescentes do pó de rocha não foram significativos sobre a liberação e disponibilidade de Mg para ambas culturas estudadas (Figura 5 e 6).

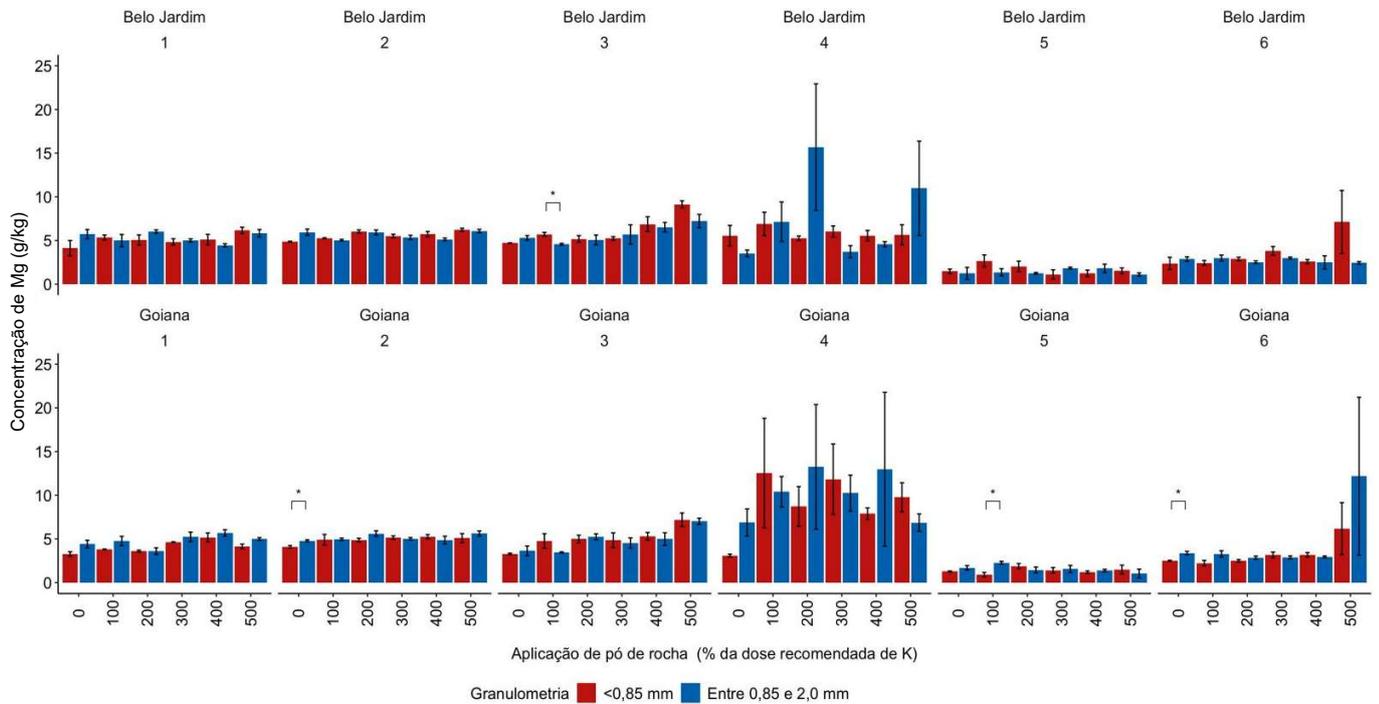
A aplicação de pó de rocha, especialmente nas doses mais altas, promoveu aumento na concentração de magnésio no milho, mais especificamente no solo de Goiana (Figura 6). No solo deste local, o efeito foi significativo na dose de 300% no segundo ciclo, onde a granulometria mais fina ( $<0,85\text{mm}$ ), obteve uma maior eficiência no solo de Belo Jardim.

Houve um efeito significativo da granulometria na dose de 300% para o milho do segundo ciclo no solo de Goiana (Figura 6), onde a granulometria mais fina (<0,85mm), obteve uma maior eficiência. Da mesma forma observa-se no Figura 5°, no 3° ciclo do solo de Belo Jardim na dose de 100%. Estes resultados mostram que, entre vários fatores que determinam a solubilização e liberação de nutrientes do pó de rocha, está a granulometria do material, que quanto menor, maior será sua área de contato com o solo, facilitando assim a liberação dos nutrientes no meio (DETTMER et al., 2019).

**Figura 6:** Concentração de magnésio na matéria seca de plantas de soja submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.



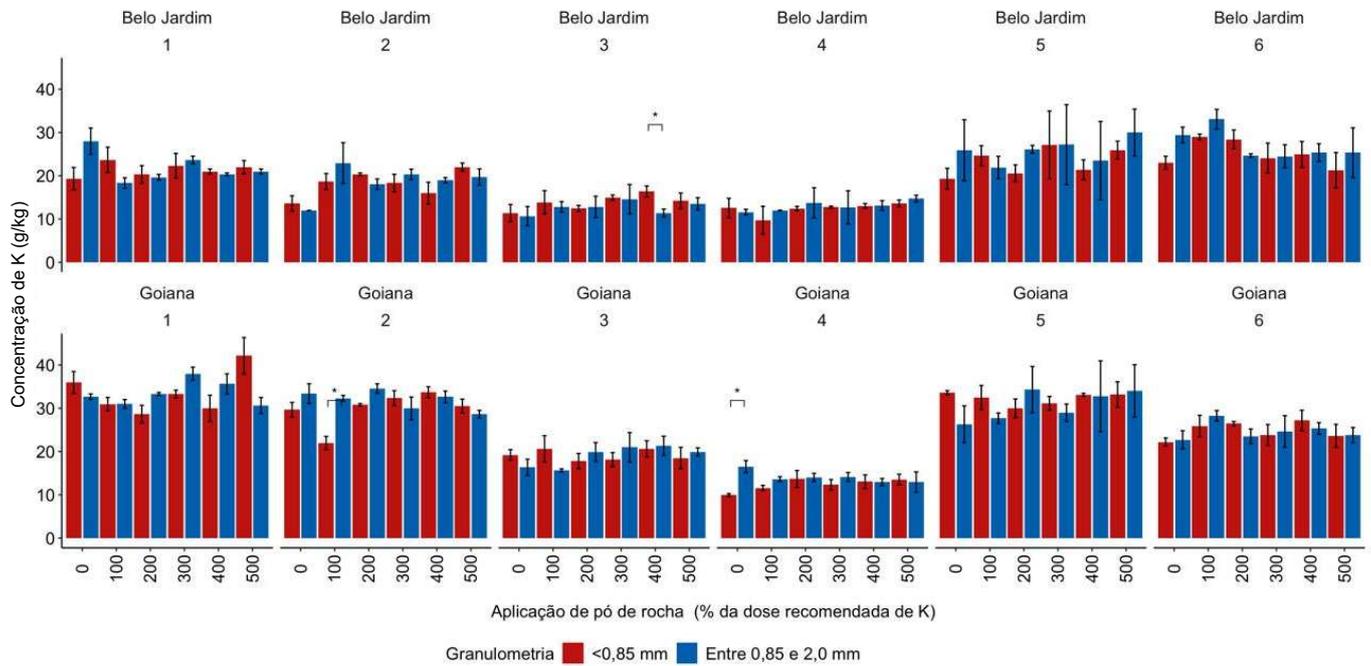
**Figura 7:** Concentração de magnésio na matéria seca de plantas de milho submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.



#### 4.5. Concentração de Potássio no tecido vegetal das plantas

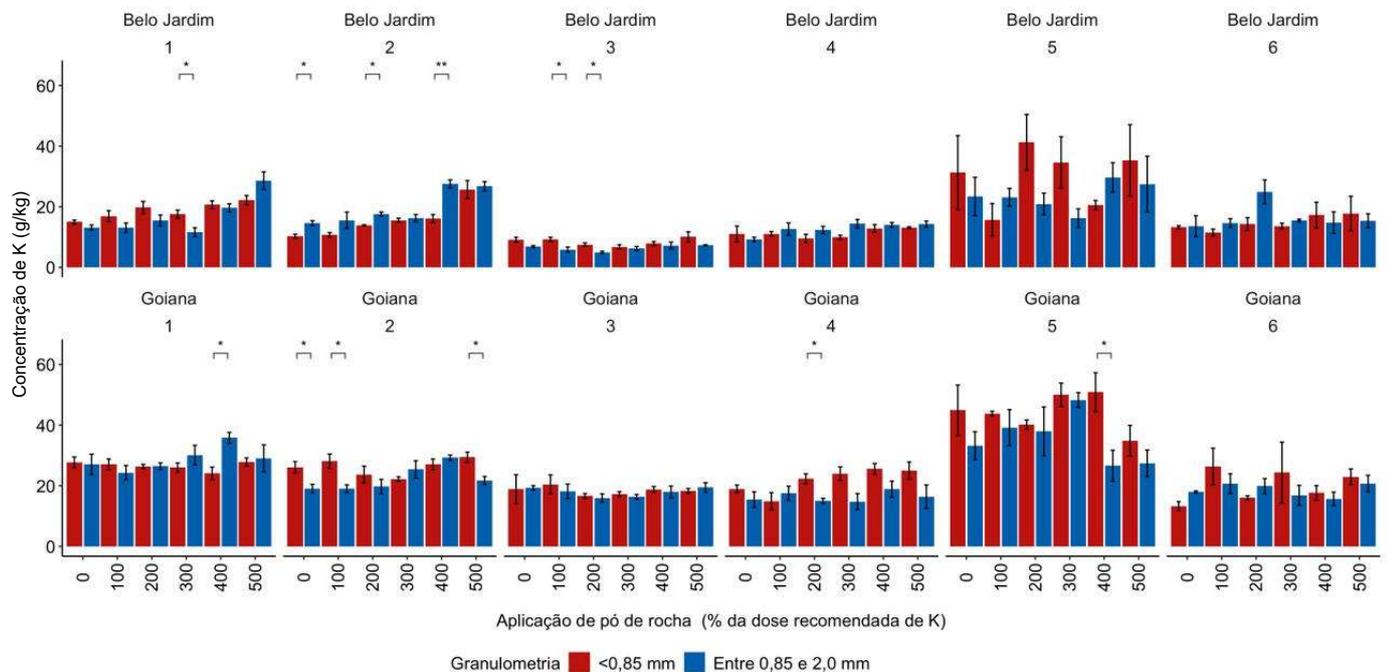
As Concentrações de potássio nas plantas aumentaram significativamente com o aumento nas doses de pó de rocha (figura 7 e 8), especialmente para milho no solo de Goiana. A falta de resultado significativo na disponibilidade imediata de K na nas plantas de acordo com as quantidades de pó de rocha aplicadas, também estão de acordo com os valores apresentados por Rajj et al. (2001). Os autores destacam que o pó de rocha basáltico apresenta potencial para fornecimento de K em diversas culturas agrícolas. Por ter liberação lenta no sistema, o efeito da aplicação de pó de rocha pode não ser imediato e o elemento pode estar mais disponível depois de mais de um ciclo de cultivo.

**Figura 8:** Concentração de potássio na matéria seca de plantas de soja submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.



Em relação ao tempo de duração dos experimentos Silveira et al. (2019) sugerem um tempo de 36 meses, sendo 12 meses de experimento em casa de vegetação e 24 meses para experimento de campo.

**Figura 9:** Concentração de potássio na matéria seca de plantas de milho submetidas a duas granulometrias de pó de rocha em quantidades crescentes.



Observa-se que, em geral, a Concentração de potássio na parte aérea das plantas de milho (Figura 8) varia em resposta ao aumento da dose de pó de rocha aplicada, embora essa relação não seja linear para todas as condições testadas. Em Belo Jardim, alguns ciclos (1º, 2º e 3º) demonstraram diferenças estatisticamente significativas entre as granulometrias, com valores mais elevados de K associados principalmente a granulometria <0,85mm, conforme indicado pelos asteriscos no gráfico. De maneira similar, no solo de Goiana, houve diferenças estatisticamente significativas nos ciclos 1º, 2º, 4º e 5º, sugerindo que a granulometria do pó de rocha influencia a liberação e absorção do potássio pelas plantas.

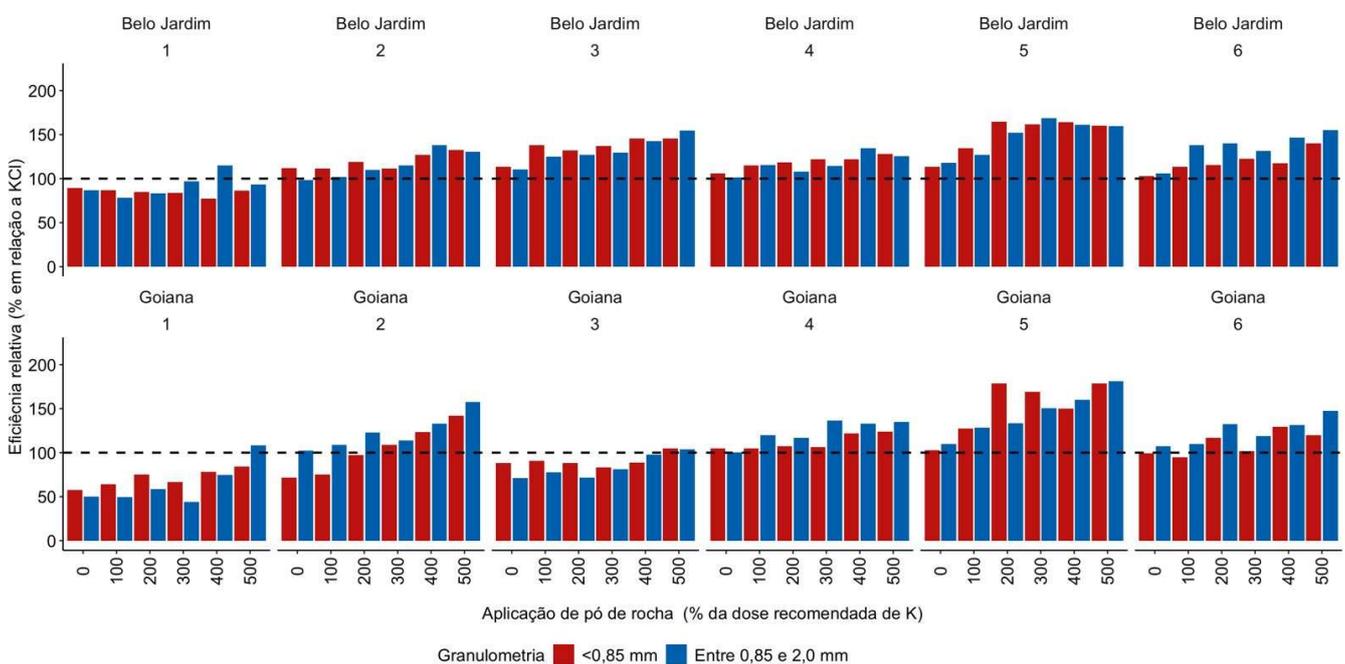
As respostas das plantas de milho e soja à aplicação de pó de rocha foram diferentes. Isso pode ser explicado pelos diferentes tipos de metabolismo e necessidades de K de cada planta. Além disso, as plantas cultivadas em Belo Jardim apresentaram, em alguns casos, maiores concentrações de K em comparação com as plantas cultivadas em Goiana. No solo de Belo Jardim, em geral não houve uma resposta crescente de acordo com o aumento das doses de pó de rocha em relação ao solo de Goiana. Isso porque o solo de Belo Jardim tem uma

fertilidade natural superior ao solo de Goiana. Observando os resultados encontrados nos atributos da matéria vegetal das plantas (Figura 7 e 8), o solo de Belo Jardim apresentava boa reserva de nutrientes para as plantas, independente dos tratamentos. Solos com essa característica não respondem rapidamente à adubação (FONSECA, 2011).

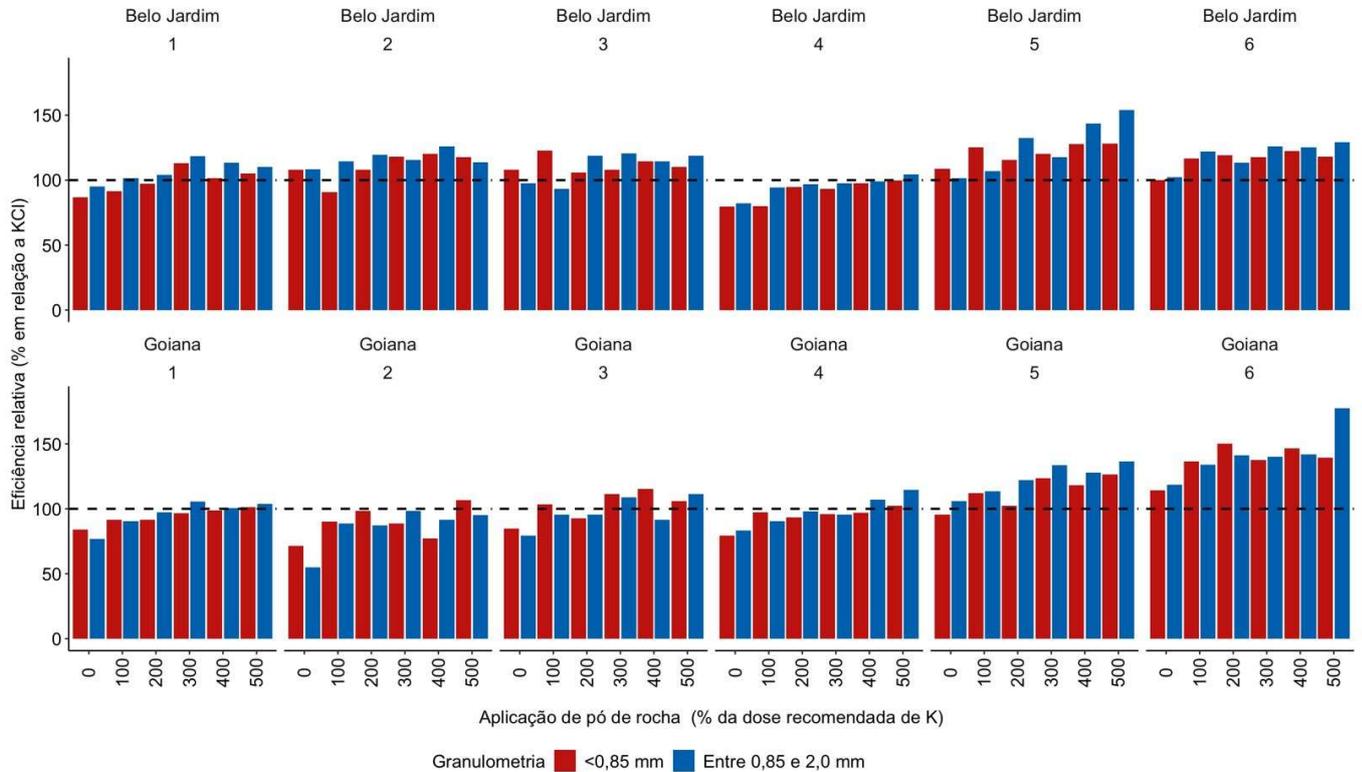
Consta-se, portanto, que na avaliação feita nesse estudo, é visível a compreensão das respostas no que se refere à liberação dos nutrientes ao longo do tempo do experimento. Deve ser destacada, o potencial de liberação dos nutrientes do pó de rocha, cuja aplicação ao solo resultou nos maiores níveis de nutrientes liberados em comparação dos demais tratamentos testados.

#### 4.6. Índice de Eficiência Agrônômica (IEA) do pó de rocha

**Figura 10:** Efeito da Granulometria e da Dose de Pó de Rocha na Eficiência Relativa de plantas de milho em Diferentes Solos



**Figura 11:** Efeito da Granulometria e da Dose de Pó de Rocha na Eficiência Relativa de plantas de soja em Diferentes Solos.



A eficiência do pó de rocha como fornecedor de K em relação à adubação com KCl tendeu a aumentar com os ciclos de cultivo sucessivos de soja, nos dois solos testados (Figura 10). Nas doses mais baixas (0 a 200% da dose recomendada de K), a eficiência relativa foi de ligeiramente inferior a ligeiramente superior a 100%, mas nas doses mais altas (300 a 500% da dose recomendada de K) a eficiência tendeu a ser sempre acima de 100%, especialmente no último ciclo de cultivo e no solo de Goiana, quando atingiu mais de 130%. O comportamento foi semelhante em relação às duas granulometrias..

Resultados semelhantes foram obtidos para a cultura de milho, mas com eficiências relativas um pouco inferiores às obtidas para a soja (Figura 9). Por alguma razão, as eficiências aumentaram até o quinto cultivo e caíram no sexto.

A adubação com KCl nas plantas tem um efeito de liberação de potássio para o solo muito rápido e em grande quantidade e, por apresentar uma carga elétrica menor (em relação

a outros íons), o íon  $K^+$  é pouco adsorvido nos coloides do solo (ERNANI et al., 2007) e quando presente na solução do solo, se desloca verticalmente em seu perfil principalmente pela água de drenagem e dessa forma, pode ser facilmente perdido por lixiviação (OLIVEIRA; VILLAS BOAS, 2008).

A utilização do pó de rocha pode ser uma alternativa complementar ao uso do KCl, inclusive possibilitando menor perda de  $K^+$  por lixiviação, porém há uma necessidade de planejamento quanto ao ciclo da cultura e época de semeadura (CRUZ, 2024).

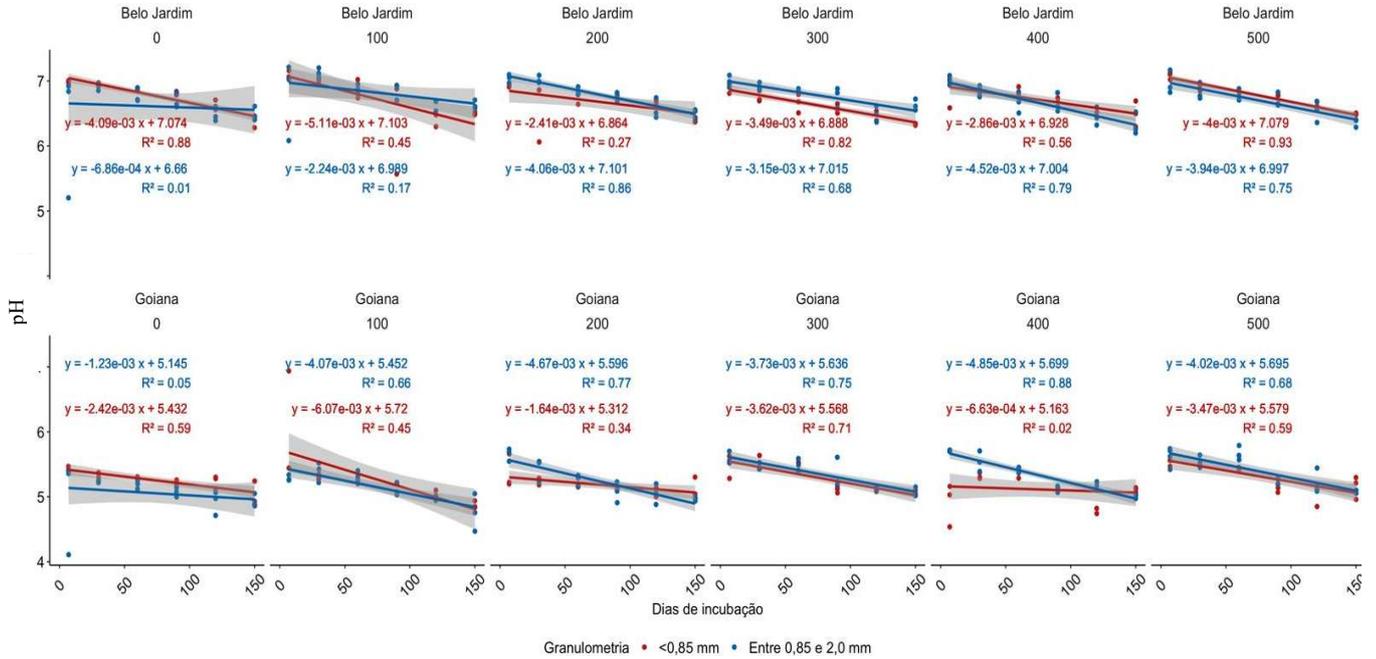
#### **4.7. Teste de incubação dos solos**

Não houve diferenças significativas no pH dos solos ao longo do tempo de incubação com a adição de pó de rocha em nenhuma das duas granulometrias e nem com as seis doses (Figura 11), provavelmente pela liberação baixa de cátions básicos que influenciam na neutralização de prótons ( $H^+$ ). Ao contrário, houve uma tendência, não significativa, de acidificação do meio ao longo do tempo, mas que não dificilmente seria causada pelo pó de rocha e que poderia ter resultado da decomposição da matéria orgânica do solo, produzindo  $H^+$  e  $CO_2$  dissolvido e formando ácidos orgânicos fracos, como o ácido carbônico (HUANG; CHEN, 2009).

Também não houve diferenças significativas nas concentrações de K nos solos (Figura 12). Entretanto, enquanto as concentrações permaneceram praticamente constante, ao longo do tempo, nos solos sem a adição do pó de rocha, nos solos com adição houve tendências de aumento nas concentrações e ligeiramente mais pronunciadas com as maiores doses. A ausência de lixiviação contínua com a incubação em recipientes fechados, como recomenda a Embrapa, pode ter limitado a formação de um gradiente de concentração de K entre a solução do solo e o pó de rocha que conduziu à liberação de  $K^+$  na solução.

Combinando os resultados de pH e K pode-se concluir que o tempo de incubação não foi suficiente e que futuros testes devem ser feitos com períodos de incubação mais prolongados.

**Figura 12:** pH dos solos em experimento de incubação submetido a duas granulometrias de pó de rocha em doses crescentes.



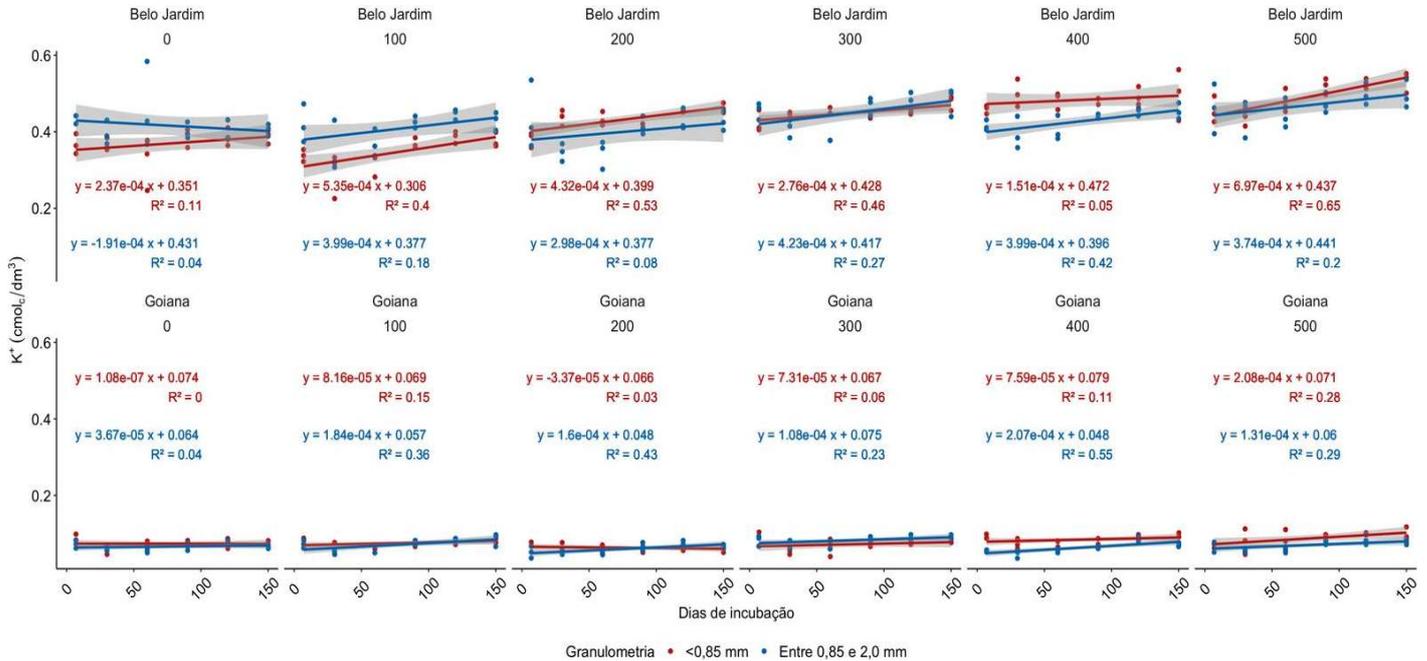
Entretanto, cabe salientar que o disposto no protocolo da Embrapa inicialmente descrito é uma sugestão e não uma obrigatoriedade a ser seguida durante os experimentos com potenciais remineralizadores. Como observado no disposto no Art. 9, inciso II, da IN 05/2016 do MAPA.

“Art. 9º Para o registro de remineralizadores, observar-se-á:

(...)

II - Para os produtos que não foram testados pela pesquisa brasileira, sem prejuízo do disposto no art. 4º desta Instrução Normativa, o registro somente será concedido após a realização de ensaios agrônômicos por instituições oficial ou credenciada de pesquisa, conduzidos com plantas e obrigatoriamente em casa de vegetação ou a campo, podendo esses ensaios ser complementados com testes de incubação ou em colunas de lixiviação, que demonstrem de forma conclusiva que o produto se presta ao fim a que se destina.” (BRASIL, 2016).

**Figura 13:** Quantidades de K nos solos em experimento de incubação submetido a duas granulometrias de pó de rocha em doses crescentes.



Observa-se que, conforme o nível aplicado aumenta, há uma tendência geral de incremento na inclinação das curvas de regressão linear, indicando um aumento na disponibilidade de  $K^+$  com o passar dos dias de incubação.

Redin (2023), em um estudo com pó de basalto na cultura da soja, verificou que uma dose igual ou acima de 60t/ha apresenta uma produtividade igual ou superior ao tratamento com NPK, sendo esta uma dose muito acima das doses testadas no presente estudo.

## 5. CONCLUSÕES

Não houve diferenças suficientes para definir a melhor granulometria de pó de rocha quanto à disponibilização de cálcio e magnésio durante os ciclos estudados;

A granulometria <0,85mm foi mais eficiente na disponibilização de K para as plantas que a granulometria de 0,85 a 2,00mm.

No ensaio de incubação dos solos não houve alterações significativas no pH e no K,

embora tenha havido tendências a diminuição no pH e aumento na concentração de K com o tempo, independente da granulometria e das doses do pó de rocha. Portanto, o tempo de incubação de 150 dias não foi suficiente e incubações mais prolongadas devem ser testadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARNIO, T., RÄTY, M., MARTIKAINEN, P.J., 2003. Long-term availability of nutrients in forest soil derived from fast- and slow-release fertilizers. **Plant Soil** 252, 227–239.

ARNHOLD, E., 2013. **Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses**. Braz. J. Vet. Res. Anim. Sci. 50, 488.  
<https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.v50i6p488-492>

ALMEIDA, J. et al. Relatório de pesquisa: Ensaio de eficiência agrônômica da rocha olivina melilitito como remineralizador de solos para uso na agricultura. Fiepe: UDESC, Lages, 2018.

ALOVISI, A. A. et al. Chemical attributes of soil and response of wheat to serpentinite in direct seeding system. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 6, p. p460, 2019.

ALOVISI, A. M., TAQUES, M. M., ALOVISI, A. A., TOKURA, L. K., SILVA, J. A. M. & CASSOL, C. J. (2020). Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solo. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 9, 918-32.

ALOVISI, A. M. Uso do pó de rocha basáltica como fertilizante alternativo na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e33710615599-e33710615599, 2021.

ANDA, M.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 132, p. 1-11, 2013.

BAMBERG, L.A., SILVEIRA, C., EDS, MARTINS, BERGMANN, M., MARTINAZZO, R., THEODORO, S.H., 2017. **Anais 3 Congresso Brasileiro de Rochagem**. (Falta info??)

BASAK, B.B., SARKAR, B., SANDERSON, P., NAIDU, R., 2018. Waste mineral powder supplies plant available potassium: evaluation of chemical and biological interventions. **J. Geochem. Explor.** 186, 114–120.

BATES, D., MÄCHLER, M., BOLKER, B., WALKER, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**. 67, 1–48.  
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

BRASIL. (2016). Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. **Diário Oficial da União, República Federativa do Brasil**.

BURGHELEA, C.I., DONTSOVA, K., ZAHARESCU, D.G., MAIER, R.M., HUXMAN, T., AMISTADI, M.K., et al., 2018. Trace element mobilization during incipient bioweathering of four rock types. **Geochim. Cosmochim. Acta** 234, 98–114.

CASTRO, R. D., TEIXEIRA, P. C., PEREIRA, R. N., LOIOLA, J. A. D., PEREIRA, M. G., ZONTA, E. Curvas de resposta do milho à adubação potássica obtidas através de experimento fatorial. **Revista Agrária Acadêmica**, v. 5, n. 2, Mar/Abr (2022).

CAVALCANTI, F. J. A. (Coord.). **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2a. aproximação**. 3. ed. rev. Recife: IPA, 2008.

CRUZ, T. B.. Eficiência agrônômica de fontes alternativas de potássio na cultura do milho. 2024. 87 f. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J., 2013. An Introduction to the rock-forming minerals. 3rd ed. **The Mineralogical Society**, London.

DETTMER, C. A. et al. Agricultura e inovação: estudo sobre a viabilidade de uso do ‘pó de rocha’ em sistemas de produção agrícola. In: **ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO**, 3., 2019, Naviraí. Anais... Naviraí: UFMS, 2019. p. 1-10.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (2019). **Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores de solo**—primeira versão. Brasília. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/registro-estab-e-prod/registroprodutos/protocolo-remineralizadores-30-01-19.pdf>

ERNANI, P. R., BAYER, C., ALMEIDA, J.A., CASSOL, P.C., 2007. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, (31) 2, 393-402

FONSECA, J. A.; HANISCH, A. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SPAGNOLLO, E. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico afetados pela aplicação de pó de basalto. In: **Congresso brasileiro de ciência do solo**, 33., 2011, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: anais. Uberlândia: SBCS: UFU: ICIAG, 2011.

FYFE, W.S., LEONARDOS, O.H., THEODORO, S.H., 2006. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Annals of the Brazillian Academy Sciences**. 78 (4), 715–720.

GOTT, R. M., AQUINO, L. A. DE ., CARVALHO, A. M. X. DE ., SANTOS, L. P. D. DOS ., NUNES, P. H. M. P., & COELHO, B. S.. (2014). Índices diagnósticos para interpretação de análise foliar do milho. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, 18(11), 1110–1115. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1110-1115>

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

GLAZNER, Allen F.; BARTLEY, John M.; COLEMAN, Drew S. A more informative way to name plutonic rocks. **GSA Today**, Boulder, v. 29, n. 2, p. 4–10, Feb. 2019.

HAYNES, R. J. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. **Fertilizer research**, v. 6, p. 235-255, 1985.

HARLEY, A.D., GILKES, R.J., 2000. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 56, 11–36.

HUANG CC, CHEN ZS. Carbon and nitrogen mineralization of sewage sludge compost in soils with a different initial pH. **Soil Sci Plant Nutr.** 2009;55(5):715-24. doi: 10.1111/j.1747-0765.2009.00410.x

KASSAMBARA, A., 2023. ggpubr: “ggplot2” Based Publication Ready Plots.

KLEIV, R.A., THORNHILL, M., 2007. Production of mechanically activated rock flour fertilizer by high intensive ultrafine grinding. **Miner. Eng.** 20 (4), 334–341.

KORCHAGIN, J. Critérios mineralógicos, químicos e físicos para uso agronômico de pó de basalto hidrotermalizado no sul do Brasil. 2018.

LAVIOLA, BG E DIAS, (2008) Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão- manso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 32, 1969-1975.

LEWIS, A. L.; SARKAR, B.; WADE, P.; KEMP, S. J.; HODSON, M. E.; TAYLOR, L. L.; YEONG, K. L.; DAVIES, K.; NELSON, P. N., BIRD, M. I.; KANTOLA, I. B.; MASTERS, M. D.; DELUCIA, E.; LEAKE, J. R.; BANWART, S. A.; BEERLING, D. J. Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering. **Applied Geochemistry**, v. 132, 105023, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105023>.

LI, J., MAVRODI, D.V., DONG, Y., 2020. Effect of rock dust-amended compost on the soil properties, soil microbial activity, and fruit production in an apple orchard from the Jiangsu province of China. **Arch. Agron. Soil Sci.** 16, 1–14.

LUCHESE, A.V., LEITE, I.J.G. de C, ALVES, M.L. VIECELE, J.P.S; PIVETTA, L.A.; MISSIO, R. F. Can basalt rock powder be used as an alternative nutrient source for soybeans and corn? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p. 4044-4054, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01322-3>.

MANNING, D.A., THEODORO, S.H., 2020. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **Ext. Ind. Soc.** 7 (2), 480–487.

**Manual de métodos de análise de solo** / PAULO CÉSAR TEIXEIRA ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

MARSCHNER, H., 2002. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. **Academic Press**, Amsterdam.

OLIVEIRA, M.V.A.M., VILLAS BOAS, R.L., 2008. Uniformidade de distribuição do potássio e do nitrogênio em sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Engenharia Agrícola**, 28 (1), 95- 103, 2008.

PARIKH, S. AND JAMES, B. (2012). Soil: the foundation of agriculture. **Nat. Educ. Knowl**, 3(10), p.2. Available at: <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-the-foundation-ofagriculture-84224268>.

R Core Team, 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

RAMOS, C.G. et al. Possibilities of using silicate rock powder: an overview. **Geoscience Frontiers**, v.13, n.1, Jan. 2022. Article 101185.

RAY, D.K., WEST, P.C., CLARK, M., GERBER, J.S., PRISHCHEPOV, A.V., CHATTERJEE, S., 2019. Climate change has likely already affected global food production. **PLOS One** 14 (5), e0217148.

REDIN, M.; SEIDEL, E. G.; SILVA, D. M.; SOUZA, E. L.; GUERRA, D.; LANZANOVA, M. E. Desempenho da cultura da soja com diferentes doses de pó de basalto em Latossolo no sul do Brasil: adubação alternativa, *Glycine max*, pó de rocha. **Agroecologia: produção e sustentabilidade em pesquisa**, v. 3, p. 234–245, 2023.

RESENDE, A.V.; MACHADO, C.T.T.M.; MARTINS, E.S.; SENA, M.C.; NASCIMENTO, M.T.; SILVA, L.C.R. & LINHARES, N.W. (2006). Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Revista Espaço e Geografia** 9(1):135-61.

RIBEIRO, I.D.A., VOLPIANO, C.G., VARGAS, L.K., GRANADA, C.E., LISBOA, B.B., PASSAGLIA, L.M.P., 2020. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. **Front. Plant Sci.** 11, 590774.

SANCHEZ, P.A., 2019. Properties and management of soils in the tropics. **Cambridge University Press**.

SILVEIRA, C.A.P.; BAMBERG, A.L.; MARTINAZZO, R.; PILLON, C.N.; MARTINS, E.D.; PIANA, C.F.B.; FERREIRA, L.H.G.; PEREIRA, I.S. Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores de solo – primeira versão. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 23p., 2019

SCHLESINGER, W.H., BERNHARDT, E.S., 2013. Biogeochemistry: An analysis of global change. 3rd ed. **Academic Press**, Waltham, Mass.

SCHMIDT, K. E., CEZIMBRA, J. C. G., FILHO L. E. N. C., BIANCHETTO, R., FONTANIVE, D. E., & SOUZA, E. L. (2019). Utilização do pó de rocha em substituição a adubação mineral tradicional na cultura da soja no noroeste do estado do RS. UERGS.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150976, 10 fev. 2022.

TAVARES, LD.F., DE CARVALHO, A.M.X., CAMARGO, L.G.B., PEREIRA, S.GD.F., CARDOSO, I.M., 2018. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.** 7 (2), 89–98.

VAN STRAATEN, P., 2007. Agrogeology: The use of rocks for crops. **Enviroquest Ltd**, Cambridge, Ontario Canada 440 p.

VERBRUGGEN, E., STRUYF, E., VICCA, S., 2021. Can arbuscular mycorrhizal fungi speed up carbon sequestration by enhanced weathering? **Plants People Planet** 3 (5), 445–45.

WEIL, R.R., BRADY, N.C., 2017. The nature and properties of soils. **Pearson Prentice Hall**, Harlow, London, New York NY.

WICKHAM, H., 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.

Zou, H.; Zhang, N.N.; Pan, Q.; Zhang, J.H.; Chen, J.; Wei, G.H. Hydrogen sulfide promotes nodulation and nitrogen fixation in soybean-rhizobia symbiotic system. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 32, n. 8, p. 972–985, 2019.