



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA (FAV)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**RESPOSTA DO FEIJOEIRO E DA SOJA A LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE
PÓ DE ROCHA NO CERRADO MINEIRO**

LÍVIA PERES CARNEIRO DE MENDONÇA

ORIENTADOR: PROF. DR. DELVIO SANDRI

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 2025

BRASÍLIA/DF

ABRIL DE 2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RESPOSTA DO FEIJOEIRO E DA SOJA A LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E
DOSES DE PÓ DE ROCHA NO CERRADO MINEIRO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA

Aprovada por:

DELVIO SANDRI (Orientador), Dr. - FAV/Universidade de Brasília

CICERO CÉLIO DE FIGUEIREDO (membro interno) Prof. Dr. - FAV/Universidade de Brasília

ITAMAR ROSA TEIXEIRA (membro externo), Prof. Dr. – CET/Universidade Estadual de Goiás

SÉRGIO PLENS ANDRADE (membro externo), Prof. Dr. – Universidade Federal de Rondonópolis - UFMT

JOÃO JOSÉ DA SILVA JUNIOR (Suplente) - FAV/Universidade de Brasília

BRASÍLIA/DF, 16 de abril de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Mendonça, Livia Peres Carneiro de.

Resposta do feijoeiro e da soja a lâminas de irrigação e doses de pó de rocha no Cerrado mineiro./ Livia Peres Carneiro de Mendonça; Orientação de Delvio Sandri. - Brasília, 2025.

145p.: il.

Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2025.

1. Química do solo. 2. Umidade do solo. 3. Lâminas de irrigação. 4. Pó de rocha. 5. Feijão. I. Sandri, D. II. Título.

CDD ou CDU

Agris / FAO

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENDONÇA, L. P. C. **Resposta do feijoeiro e da soja a lâminas de irrigação e doses de pó de rocha no Cerrado mineiro.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2025, 145p., Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Livia Peres Carneiro de Mendonça

TÍTULO DA TESE: Resposta do feijoeiro e da soja a lâminas de irrigação e doses de pó de rocha no Cerrado mineiro

GRAU: Doutorado

ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Livia Peres Carneiro de Mendonça

CPF:067648556-17

Endereço: Rua Lauro Guimarães, 39. Centro. Paracatu - MG

Tel.: 38 99916-5770

E-mail: liviapcm@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha querida família, que esteve ao meu lado em cada passo dessa jornada.

Ao meu esposo Leonardo, por seu apoio incondicional, paciência e incentivo nos momentos mais desafiadores. Sua confiança em mim foi uma força motriz em todos os dias dessa caminhada.

Ao meu filho Eduardo, cuja luz e alegria me inspiram a buscar sempre o melhor. Que seu futuro seja pautado pelos princípios de sustentabilidade e respeito à terra, por um mundo mais justo e equilibrado.

E à minha família como um todo, que sempre acreditou nos meus sonhos, mesmo quando o caminho parecia árduo. Esta conquista é, sem dúvida, o resultado do amor e do apoio de cada um de vocês.

Por fim, dedico este trabalho a todos os agricultores e defensores do desenvolvimento sustentável, cujas práticas e ensinamentos moldam não apenas o presente, mas o futuro de nosso planeta. Que cada semente plantada continue a florescer em um solo fértil de esperança e inovação.

AGRADECIMENTOS

Concluir esta tese de doutorado é, para mim, a realização de um sonho que jamais teria sido possível sem o apoio e a colaboração de tantas pessoas especiais. Aqui, registro minha profunda gratidão.

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar todos os desafios dessa jornada.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado. Ao meu pai, Décio, que com sua sabedoria e exemplo de vida me ensinou o valor do trabalho duro e da dedicação. A Fazenda Barra do Lagoão, nossa terra, que foi fonte de inspiração, nutrindo em mim o amor pela agricultura e pela sustentabilidade.

Ao meu esposo Leonardo, por sua paciência, carinho e apoio incondicional em cada etapa dessa caminhada. Você foi meu porto seguro em todos os momentos, e sua confiança em mim me deu forças para seguir em frente. Ao nosso filho Eduardo, que, com sua alegria e luz, me inspirou a ser melhor todos os dias. Que esta conquista sirva de exemplo para você perseguir seus próprios sonhos.

Ao meu orientador, Professor Delvio Sandri, que com sua expertise e dedicação me guiou com segurança e sabedoria ao longo de todo o processo. Sua confiança no meu potencial foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ainda aos colegas de faculdade que de alguma forma contribuíram a realização desta tese, ao apoio da professora Maria Lucrécia Generosa Ramos, aos colegas Jesus, Lemerson, Sérgio, ao técnico de laboratório Daniel, ao amigo Gilberto e a todos os funcionários da fazenda Barra do Lagoão, em especial ao Fulô e o Sr. Luiz. A companhia e o apoio de vocês tornaram essa jornada muito mais leve e significativa.

Por fim, dedico um agradecimento especial a todos os agricultores que, com sua perseverança, mantêm viva a chama do desenvolvimento sustentável. Vocês são a verdadeira base do futuro que queremos construir.

A todos, meu sincero agradecimento. Esta conquista também é de vocês.

SUMÁRIO

viii

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS..... ix

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES..... xii

RESUMO..... xiii

ABSTRACT..... xiv

1. INTRODUÇÃO 16

2. OBJETIVOS 19

2.1 Objetivo Geral 19

2.2 Objetivos Específicos..... 19

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

3.1 Cultura do feijoeiro 20

3.2 Cultura da soja 22

3.3 Fertilidade, manejo do solo e tratamento de sementes de feijoeiro e soja 23

3.4 Necessidades hídricas para o feijoeiro e a soja 26

3.5 O pó de rocha como remineralizador do solo 29

 3.6.1 Legislação, interferência e disponibilidade do pó de rocha na composição química do solo e efeito nas plantas 33

 3.6.2 Alterações na geoquímica dos solos com o provimento de pó de rocha 35

 3.6.3 Fatores que influenciam a cinética de absorção do pó de rocha 37

 3.6.4 Respostas morfológicas e fisiológicas das plantas associadas ao uso do pó de rocha 41

 3.6.5 Alterações no teor de nutrientes das plantas relacionadas ao uso do PR 43

3.7 Produtos microbiológicos para potencializar o uso do PR..... 44

4. MATERIAL E MÉTODOS 46

4.1 Área experimental 46

4.2 Dados climatológicos 47

4.3 Caracterização físico-hídrica do solo..... 49

vi

4.4 Correção com calagem e gesso agrícola, adubação inicial do solo e tratos culturais.....	49
4.5 Análise química do solo no final do ciclo de cultivos do feijoeiro e da soja ...	51
4.6 Inoculação e tratamento de sementes.....	52
4.6.1 Sementes de feijão.....	52
4.6.2 Sementes de soja.....	52
4.7 Cultivares utilizadas.....	52
4.7.1 Cultivar de feijoeiro.....	52
4.7.2 Cultivar de soja.....	53
4.8 Descrição do pó de rocha.....	53
4.10 Irrigação.....	55
4.10.1 Sistema de irrigação.....	55
4.10.2 Uniformidade de distribuição de água.....	56
4.10.3 Manejo da irrigação.....	56
4.11 Análises morfológicas e fisiológicas do feijoeiro e da soja	59
4.11.1 Feijoeiro.....	59
4.11.2 Soja.....	60
4.12 Análise estatística	61
4.13 Análise multivariada	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
5.1 Resultados do feijoeiro.....	62
5.1.1 Atributos morfológicos.....	62
5.2 Resultados da soja.....	73
5.2.1 Análise de variância e atributos morfológicos da soja.....	73
5.2.2 Atributos fisiológicos da soja	79
5.3 Características químicas do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja⁸⁶	
5.3.1 Feijoeiro.....	86

5.3.2 Soja.....	88
5.4 Análise conjunta das características químicas do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.....	89
5.5 Análise multivariada dos componentes químicos do solo	112
5.5.1 Atributos químicos do solo no final do ciclo do feijoeiro	112
6.5.2 Atributos químicos do solo no final do ciclo da soja	115
7. CONCLUSÕES	117
8. REFERÊNCIAS.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos atributos químicos e textura do solo na camada 0 a 0,20 m antes da instalação do experimento com cultivo do feijoeiro e soja.....	50
Tabela 2. Análise de variância dos atributos morfológicos da soja em função das doses de PR e NPK e Li.	73
Tabela 3. Análise de variância dos atributos fisiológicos da soja em função das doses de PR, NPK e Li.	79
Tabela 4. Análise de variância dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m no final do ciclo de cultivo do feijoeiro.	86
Tabela 5. Análise de variância dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m no final do ciclo de cultivo da soja.	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais influências para a resposta ao intemperismo pelo PR.	38
Figura 2. Demonstração dos processos do intemperismo para a formação do metamorfismo e das rochas formadoras dos solos agrícolas.	39
Figura 4. Localização da Fazenda Barra do Lagoão, Paracatu-MG.	48
Figura 5. Área experimental para o cultivo do feijão e soja com visualização da área umedecida e distribuição do sistema de irrigação por gotejamento superficial.	49
Figura 6. Visualização do PR utilizado no experimento.	54
Figura 7. Distribuição dos tratamentos de cultivo do feijoeiro e da soja.	55
Figura 8. Coeficiente de Cultura (Kc), evapotranspiração da cultura (ETc) e Li aplicadas a cada dois dias após semeadura do feijoeiro.	57
Figura 9. Precipitação, coeficiente de cultura (Kc), evapotranspiração da cultura (ETc) e Li aplicadas a cada dois DAS da cultura da soja.	58
Figura 10. Imagem do experimento com soja (A) e medição de parâmetros fisiológicos da soja com o uso do IRGA (B).	61
Figura 11. Altura da planta (AP) e diâmetro do coleto (DC) para as Li de L1, L2, L3 e L4 e variação (%) de L1 em relação a L4 (A e B), e, em função das doses de PR e NPK para cada Li (C e D).	63
Figura 12. Massa úmida (MuAe) (A) e massa seca (MsAe) (B) da parte aérea, massa úmida (MuRa) (C) e massa seca (MsRa) (D) das raízes do feijoeiro para diferentes doses de pó de rocha (T0, P1, P3, P5, P7 e NPK) e lâminas de irrigação ((L1 = 120%, L2 = 100%, L3= 80%, L4 = 60%).	66
Figura 13. Valores condutância estomática (gs) e taxa fotossintética (A) para as dosagens de pó de rocha (P1, P3, P7) e NPK e Li ((L1 = 120%, L2 = 100%, L3= 80% e L4 = 60% da ETc).	68
Figura 14. Transpiração (E) e carbono interno (Ci) para as dosagens de pó de rocha (P1, P3, P7) e NPK (A) e lâminas de irrigação (L1 = 120%, L2 = 100%, L3= 80% e L4 = 60% da ETc).	70
Figura 15. Eficiência instantânea da carboxilação (EiC) e eficiência no uso de água (EUA) para as dosagens de pó de rocha (P1, P3, P7) e NPK (A) e lâminas de irrigação (L1, L2, L3 e L4).	72
Figura 16. Altura da planta (AP) e diâmetro do coleto (DC) para as Li de L1, L2, L3 e L4 e PR (P1, P3, P7) e NPK.	74

Figura 17. Número de Inserções (NG), Número de Vagens (NV), Peso de Mil Sementes (PMS) e Produtividade (Prod) para as Li, em função das doses de PR e NPK para cada Li.....	77
Figura 18. Níveis de Ci e A em função das doses de PR e NPK para cada Li.	80
Figura 19. Níveis de gs e E em função das doses de PR e NPK para cada Li.....	82
Figura 20. Eficiência instantânea da carboxilação (EiC) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$] e eficiência no uso de água (EUA) $(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})/(\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$ para as dosagens de PR e Li.	85
Figura 21. Valores médios de pH do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.	90
Figura 22. Valores médios de Ca do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.	92
Figura 23. Valores médios de Mg do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.....	93
Figura 24. Valores médios de Ca + Mg do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro (A e B) e da soja (C e D) e variação percentual considerando o menor valor como referência.....	95
Figura 25. Análise do Al do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja considerando a média das doses de PR e NPK dentro de cada Li.	96
Figura 26. Análise do H + Al do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.....	98
Figura 27. Valores médios de CTC do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.....	99
Figura 28. Análise do P do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja	102
Figura 29. Valores médios de K^+ do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja em função das doses de PR e NPK e das Li e variação percentual considerando o menor valor como referência.....	104
Figura 30. Análise da MO do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.	106
Figura 31. Análise do Sat Al do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.....	108
Figura 32. Valores médios de SB do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja em função das doses de PR e NPK e das Li e variação percentual considerando o menor valor como referência.....	110

Figura 33. <i>Biplot</i> dos componentes principais (PC1 e PC2) e projeção das variáveis de solo, doses de PR, NPK e Li no final do ciclo do feijoeiro.	114
Figura 34. <i>Biplot</i> dos componentes principais (PC1 e PC2) e projeção das variáveis de solo, doses de PR, NPK e Li no final do ciclo da soja precedida de um ciclo da soja.	116

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/Sigla	Significado	Unidade
A	Taxa fotossintética	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
DAS	Dias Após a Semeadura	dias
θ_{CC}	Umidade volumétrica na capacidade de campo	cm^{-3}
Ca	Cálcio	$\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$
Ci	Condutância estomática	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
CTC	Capacidade de troca catiônica	$\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$
E	Transpiração	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
EiC	Eficiência Instantânea de Carboxilação	$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})/(\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$
EUA	Eficiência do Uso de Água	$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})/(\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$
ETc	Evapotranspiração da cultura	mm dia^{-1}
ETo	Evapotranspiração de referência	mm dia^{-1}
gs	Condutância estomática	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
(H+Al)/CTC	Acidez potencial/capacidade de troca catiônica	%
IAF	Índice de área foliar	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
IN	Instrução Normativa	
K	Potássio	mg dm^{-3}
Li	Lâminas de Irrigação	mm
MAP	Fosfato Monoamônico	
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento	
Mg	Magnésio	$\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$
MO	Matéria Orgânica	%
P	Fósforo	mg dm^{-3}
pH	Potencial Hidrogeniônico	
PR	Pó de Rocha	
Sat.Al	Saturação de Alumínio	%
V	Saturação de bases	%

RESUMO

As culturas do feijoeiro e da soja desempenham um papel significativo na economia brasileira. Para garantir a viabilidade econômica dos cultivos, o manejo do solo, a irrigação e a adubação devem ser aplicadas de acordo com recomendações técnicas específicas. No bioma Cerrado, a irrigação é fundamental, sendo realizada de forma total ou suplementar, dependendo da época do ano. Quando associada ao uso de produtos que potencializam a resposta morfofisiológica das plantas, como o pó de rocha (PR), a irrigação pode aumentar a eficiência do uso da água e a produtividade. O objetivo deste estudo foi analisar a interação entre diferentes doses de PR de origem do micaxisto e lâminas de irrigação (Li), avaliando-se a disponibilização de nutrientes e desempenho agrônomo do feijoeiro, cv TAA Dama e da soja, variedade B5830 CE. Os experimentos foram implantados na Fazenda Barra do Lagoão, em Paracatu-MG, nas safras do feijão de inverno em 2022 e da soja em 2023, na mesma área, e irrigados por gotejamento superficial, em solo caracterizado como Latossolo vermelho-amarelo. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas, sendo as parcelas compostas por quatro Li correspondentes a 120 (L1), 100 (L2), 80 (L3) e 60% (L4) da ETc e nas subparcelas os tratamentos de adubação, com ureia (46%) e MAP (11,52,00 % de NPK, respectivamente) (NPK) e quatro doses de PR, sendo 1 (P1), 3 (P3), 5 (P5) e 7 (P7) t ha⁻¹, com três repetições. A reposição de nitrogênio foi realizada em cobertura com ureia para o feijoeiro, enquanto na soja, devido a eficiência da inoculação com *Bradyrhizobium javanica*, não foi aplicada. Foram avaliados os seguintes parâmetros na cultura do feijoeiro: massa úmida (MuRa) e seca das raízes (MsRa) e da parte aérea (MuAe e MsAe), diâmetro do coleto (DC), altura das plantas (AP), eficiência do uso da água (EUA), eficiência de carboxilação (EiC), taxa de assimilação de CO₂ (A), concentração intercelular de CO₂ (Ci), condutância estomática (gs) e taxa de transpiração (E). Para a soja foi avaliada a produtividade (Prod), massa de 1000 grãos (PMG), número de vagens por planta (NG) e número de inserções (NI) das ramificações, bem como os atributos fisiológicos mensurados no feijoeiro. As análises de composição química do solo foram realizadas nas camadas de 0-0,20 m, no início e no final dos ciclos do feijoeiro e da soja. Para analisar a sinergia entre os fatores (doses de PR e Li) foi aplicada a ANOVA, e quando significativo, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância para comparação de médias, bem como análise de regressão quando não houve interação significativa e análise de componentes principais nos atributos químicos do solo. O feijoeiro apresentou maior DC na dose de 7 t ha⁻¹ e AP no tratamento com NPK, sendo indiferentes em função das Li. Quanto aos demais parâmetros morfológicos, houve interação significativa entre as doses de PR e NPK e as Li para a MuAe, MsAe e MuRa. Os resultados fisiológicos do feijoeiro indicaram maior concentração em gs e A para NPK, sendo que g foi superior em L1 e A em L4. Não houve variação de E, já Ci apresentou maior valor para os tratamentos NPK associado a L1. Houve maiores valores de MsRa em P5, P7 e NPK em L1 e L4 no feijoeiro, o mesmo ocorreu para E Ci. Para EiC houve variação apenas em L4, sendo P1 inferior aos demais tratamentos. A EUA em L3 na dose P1 foi inferior aos demais tratamentos. Para a cultura da soja, os parâmetros AP, DC, NG, e PMS não apresentaram variações significativas em função dos tratamentos aplicados. Houve aumento em NV em L1 e de produtividade em NPK, comparando P0 e T1, sem influência das Li. Ci não variou significativamente e A demonstrou variação em L4, com menores valores em P3. O gs indicou aumento em L1 na dose de P7, enquanto E permaneceu constante. EiC foi menor em T0 para L1, enquanto EUA não apresentou variações entre os tratamentos. Quanto a avaliação química do solo para a cultura do feijoeiro, as doses de 5 e 7 t ha⁻¹ de PR, combinadas às Li de 80% e 100% da ETc, proporcionaram os melhores resultados para a fertilidade química do solo,

com elevação do pH, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e maior saturação por bases (SB) para feijoeiro e para a soja. Em relação às análises de solo no final do ciclo da soja, houve aumento do pH na dose de PR de P7 em L4. Os teores de Ca e Mg demonstraram estabilidade em todos os tratamentos, não houve variações para Al e H + Al. A CTC apresentou maior valor na dose de PR de P5 e de P7 para as Li de L2 e de L4. Houve aumento de P associado ao NPK independente da Li. O teor de K não variou estatisticamente. Houve maior valor de MO para a dose de PR de P5 e de P7 nas Li de L1 e de L4. De modo análogo, a menor SB ocorreu na dose P7 para a Li de L1. As maiores doses de PR se mostraram equivalentes ou superiores ao NPK para a maioria dos atributos do solo, independente da Li aplicada. De modo geral as maiores doses de PR (P5 e P7) foram equivalentes ao NPK em quase todos os parâmetros. Sugere-se novos experimentos para otimizar os resultados e encontrar mais assertivas para os cultivos do feijão e da soja.

Palavras-chave: Manejo de irrigação. Adubação. Rochagem. Resíduos de mineração.

RESPONSE OF BEANS AND SOYBEAN TO IRRIGATION DEPTH AND ROCK POWDER DOSES IN THE CERRADO MINEIRO

ABSTRACT

The common bean and soybean crops play a significant role in the Brazilian economy. To ensure the economic viability of these crops, soil management, irrigation, and fertilization must be applied according to specific technical recommendations. In the Cerrado biome, irrigation is essential, being conducted either fully or supplementarily, depending on the time of year. When associated with the use of products that enhance the morphophysiological response of plants, such as rock powder (RP), irrigation can increase water use efficiency and productivity. The objective of this study was to analyze the interaction between different doses of RP derived from mica schist and irrigation levels (Li), evaluating nutrient availability and the agronomic performance of common bean cv TAA Dama and soybean cv B5830 CE. The experiments were conducted at Barra do Lagoão Farm, in Paracatu-MG, during the winter bean crop in 2022 and the soybean crop in 2023, in the same area, irrigated by surface drip irrigation, on soil classified as Red-Yellow Latosol. The experimental design was a randomized block with split plots, with plots composed of four Li levels corresponding to 120% (L1), 100% (L2), 80% (L3), and 60% (L4) of the ETc and subplots consisting of fertilization treatments with urea (46%) and MAP (11%, 52%, and 0% of NPK, respectively) (TNPK) and four RP doses, namely 1 (P1), 3 (P3), 5 (P5), and 7 (P7) t ha⁻¹, with three replicates. Nitrogen replenishment was applied through topdressing with urea for the common bean, whereas for soybean, due to the efficiency of inoculation with *Bradyrhizobium japonica*, no nitrogen was applied. The following parameters were evaluated for the common bean crop: wet (MuRa) and dry root mass (MsRa), wet (MuAe) and dry shoot mass (MsAe), stem diameter (DC), plant height (AP), water use efficiency (EUA), carboxylation efficiency (EiC), CO₂ assimilation rate (A), intercellular CO₂ concentration (Ci), stomatal conductance (gs), and transpiration rate (E). For soybean, productivity (Prod), 1000-grain mass (PMG), number of pods per plant (NG), and number of nodes per branch (NI) were evaluated, as well as the physiological attributes measured in common bean. Soil chemical composition analyses were performed at 0-0.20 m depth, at the beginning and end of the common bean and soybean cycles. To analyze the synergy between factors (RP doses and Li), ANOVA was applied, and when significant, the Tukey test at 5% significance was applied for mean comparisons. Regression analysis was performed when there was no significant interaction, and principal component analysis was applied for

soil chemical attributes. Common bean showed a higher DC at a dose of 7 t ha⁻¹ and higher AP in the NPK treatment, with no differences among Li levels. Regarding other morphological parameters, there was a significant interaction between PR doses and NPK and Li levels for MuAe, MsAe, and Mura. Physiological results for the common bean indicated higher gs and A in NPK treatments, with gs being higher in L1 and A in L4. There was no variation in E, but Ci showed a higher value for NPK treatments associated with L1. Higher MsRa values were observed in P5, P7, and NPK in L1 and L4, and the same was true for Ci. EiC varied only in L4, with P1 being lower than other treatments. EUA in L3 at the P1 dose was lower than in other treatments. For soybean, AP, DC, NG, and PMS parameters did not show significant variations among treatments. NV increased in L1, and productivity increased in NPK when comparing P0 and T1, without Li influence. Ci did not vary significantly, but A varied in L4, with lower values in P3. The gs showed an increase in L1 at the P7 dose, while E remained constant. EiC was lower in T0 for L1, while EUA did not show variations among treatments. Regarding soil chemical evaluation for the common bean crop, the doses of 5 and 7 t ha⁻¹ of PR, combined with Li levels of 80% and 100% of ETc, provided the best results for soil chemical fertility, increasing pH, cation exchange capacity (CEC), and base saturation (SB) for both common bean and soybean. In soil analyses at the end of the soybean cycle, pH increased in the P7 dose at L4. Ca and Mg levels remained stable across treatments, with no variations in Al and H + Al. CEC showed higher values in P5 and P7 doses for L2 and L4. P content increased in NPK regardless of Li levels. K content did not vary statistically. Higher MO values were found in P5 and P7 doses at L1 and L4. Similarly, the lowest SB was observed in the P7 dose for L1. The highest PR doses were equivalent or superior to NPK for most soil attributes, regardless of Li levels applied. Overall, higher PR doses (P5 and P7) were equivalent to NPK in almost all parameters. Further experiments are suggested to optimize results and find more accurate recommendations for common bean and soybean cultivation.

Keywords: Irrigation management, fertilization, rock application, mining residues.

1. INTRODUÇÃO

A produtividade de culturas anuais implementadas no Cerrado, como o feijoeiro e a soja, exige elevados investimentos em corretivos e fertilizantes, uma vez que os solos, em geral, já passaram por intenso processo de intemperismo, o que os torna ácidos e com baixos teores de nutrientes.

O feijoeiro comum é uma Fabaceae que apresenta grande importância comercial, sendo o Brasil o maior produtor deste grão. Tendo uma produção no país relativamente estável, em torno de 3,0 milhões de toneladas por ano (FAO, 2024).

O cultivo é dividido em três safras durante o ano, que ajudam a garantir o abastecimento interno, já que o feijão é parte essencial da dieta do brasileiro. Este alimento é uma importante fonte de proteína para populações de baixa renda, contudo, fatores climáticos adversos e a redução de áreas plantadas podem impactar a produção em determinados anos. Quando há déficit na produção, o Brasil recorre à importação, sendo a Argentina um dos principais fornecedores. A produção de feijão também está diretamente ligada a questões de segurança alimentar, dada a sua importância para a dieta brasileira e a capacidade do país de suprir a demanda interna (FAO, 2024).

O seu consumo concentra-se em grande parte no mercado interno, todavia, de acordo com Conceição *et al.* (2018), tem expressividade de produção e comercialização também nas Américas, sendo um cultivo de grande impacto econômico para os mercados mundiais.

A soja também pertence à família botânica das fabáceas, porém economicamente tem uma expressividade maior que o feijoeiro, sendo uma das *commodities* mais comercializadas no mundo. O Brasil, na atualidade, é o maior produtor mundial deste grão, tendo atingido uma produção superior a 150 milhões de toneladas (safra 2022-2023), seguido por Estados Unidos, Argentina, China e Índia (Embrapa, 2023a; Agroadvance, 2023).

Um fator preponderante para que haja o crescimento e a manutenção de altos índices de produção do feijoeiro e da soja diz respeito ao correto manejo da irrigação ou do fornecimento de água em níveis adequados durante todos os seus estádios de desenvolvimento. Considera-se que estes cereais necessitem de uma alta frequência de irrigação, uma vez que são sensíveis a falta de água, principalmente o feijão, que possui um sistema radicular superficial, sendo ambas as plantas de fisiologia C3. Em situações de altas temperaturas e baixas umidades, a transpiração tende a aumentar, o que pode

comprometer a produtividade final, decrescendo o número de vagens e o enchimento de grãos (Pereira *et al.*, 2014).

O Cerrado mineiro apresenta altas temperaturas na maior parte do ano, além de meses de baixa umidade relativa do ar conjugada com baixa precipitação pluvial, o que requer o uso de tecnologias que propiciem uma irrigação eficiente, para que o fornecimento de água seja compatível a demanda da evapotranspiração de cada cultura (Cunha *et al.*, 2017)

O Brasil possui atualmente uma área irrigada de aproximadamente 6 milhões de hectares, sendo destes 1.54 milhão de hectares destinados a soja e 303 mil hectares destinados ao feijão (ANA 2021; Pereira, 2024), sendo que mais da metade destas áreas realiza duas safras ao ano e cerca de 18,2% dos empreendimentos realizam safra tripla, o que só é possível com um sistema de irrigação bem dimensionado (ANA, 2023).

Outra vantagem em manter bons níveis de irrigação deve-se a necessidade deste recurso para a absorção de nutrientes via raízes. A água tem papel fundamental para a realização de diversos processos metabólicos e fisiológicos nas plantas, sendo imprescindível para a realização da fotossíntese e para o funcionamento do sistema vascular, na realização da translocação de nutrientes e fotoassimilados, além de ser fundamental para os processos de respiração e transpiração (Carvalho *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2021).

A melhor absorção dos nutrientes e o pleno desenvolvimento fisiológico das plantas, promovidos pela irrigação constante, melhora a resposta dos cultivos, o que resulta em ganho de massa, tamanho dos grãos e consequentemente maior produtividade, sendo este fator fundamental para o abastecimento de alimentos em escala mundial. Todavia, o uso da água deve ser realizado respeitando as premissas de sustentabilidade, ou seja, deve-se primar pela utilização consciente deste recurso como insumo básico para a irrigação.

Estudos de Barbosa *et al.* (2020) indicam que o manejo da irrigação com déficit hídrico pode ser uma alternativa rentável ao produtor rural, que opera com menos gastos em insumos energéticos, desde que obedecendo a um manejo adequado pode atingir altos níveis produtivos para o cultivo. Todavia tal técnica necessita de maior aprofundamento a fim de se quantificar uma resposta do cultivo ao insumo água em dada localidade, de modo que no futuro tenham-se condições de se planejar, projetar e manejar os sistemas de irrigação.

Tanto o feijoeiro quanto a soja quando cultivados sob manejo inadequado, em relação a quantidades insuficientes para a nutrição mineral, irrigação ou ainda controle de pragas e doenças ineficiente, ainda, em detrimento do fornecimento de quantidade suficiente dos insumos necessários para o alto rendimento, expressam redução expressiva na produção de biomassa e, portanto, baixas produtividades.

Para melhorar as propriedades químicas do solo, pode-se utilizar o pó rocha (PR), sendo este um remineralizador do solo, que de acordo com Tebar *et al.* (2021) tem demonstrado capacidade de melhorar as suas propriedades químicas, uma vez que devolve ao solo minerais essenciais e benéficos que são disponibilizados de forma gradual na solução do solo.

A aplicação de PR é uma realidade em todas as regiões do Brasil, de acordo com Silva *et al.* (2024) esse material, classificado como remineralizador do solo, é um agente que promove a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, além de melhorar a estrutura dos solos e promover a redução de custos operacionais, porém, as recomendações de dosagens adequadas nas diversas condições edafoclimáticas que ocorrem nos diferentes biomas do território nacional exige mais estudos para entender a relação destas com as lâminas de irrigação, pois, a disponibilização dos nutrientes é dependente, além de outros fatores, da umidade do solo, sendo que no caso do Cerrado, a precipitação natural é muito baixa ou nula em cerca de 6 meses do ano (abril a setembro).

O uso de PR associado à irrigação tem correlação com a melhora do desempenho agrônomo e econômico do feijoeiro e da soja, pois promove a elevação da Eficiência no Uso da Água (EUA) e favorece a presença de micorrizas nas raízes, além de elevar os teores de fitato e proteína nos grãos, dentre outros benefícios (Silva *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2021).

O PR se destaca por apresentar mineralogia abrangente, responsiva, com consideráveis teores de fósforo e potássio, além de silício e tem como vantagem sua distribuição geográfica ampla ao longo do território nacional (Souza *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2021)

Mesmo não conhecendo com clareza todos os benefícios da utilização do PR e a relação com a umidade do solo, seu uso cresce rapidamente no país, devendo ter expansão nos próximos anos, haja vista que se trata de um material de baixo impacto ambiental, quanto a aplicação no solo, o que o torna ambientalmente correto.

Além disso existe um baixo valor agregado a sua comercialização, o que torna o seu custo mais acessível quando comparado aos fertilizantes químicos tradicionais, sendo

ainda obtido, muitas vezes, via rejeitos de pedreiras e de atividades de mineração, tornando a sua utilização ambientalmente mais sustentável e menos nocivo, ainda que haja algum impacto ambiental quando da sua extração nas minas e pedreiras.

A situação atual indica a necessidade do uso de tecnologias mais abrangentes, uma vez que além da alta constante dos preços dos insumos agrícolas, especialmente os importados, como os fertilizantes químicos, existe ainda a falta no fornecimento regular destes, devido à instabilidade dos estoques mundiais. A não dependência das flutuações de cambio, estoque e do protecionismo estrangeiro levará a maior competitividade do produto nacional, além de preços mais acessíveis no mercado interno e externo.

A interação entre o PR de micaxisto e as diferentes Li para o cultivo de feijão e soja ainda está muito incipiente, sendo este trabalho um dos primeiros que fazem esta abordagem e sugere-se a necessidade de trabalhos subsequentes a este, a fim de sanar dúvidas e confirmar resultados encontrados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a interação de diferentes dosagens de PR de micaxisto e Li e seu efeito na disponibilização de nutrientes ao solo, eficiência no uso da água, produtividade, respostas morfológicas e fisiológicas das culturas do feijão e da soja.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar atributos morfofisiológicos do feijoeiro e da soja cultivados na mesma área em função da sinergia entre as Li e doses de PR;
- Quantificar a produtividade da soja;
- Estimar a eficiência do uso da água (EUA);
- Avaliar as propriedades químicas do solo na camada de 0-20 cm no início e no final do ciclo da cultura do feijoeiro e da soja irrigados por gotejamento superficial.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cultura do feijoeiro

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma fabaceae de ciclo anual, cultivada em diferentes condições ambientais. Pode se desenvolver em altitudes que variam de 0 a 3000m, tem diversificados métodos de cultivo e usos, sendo comercializado tanto na forma de grãos como na forma de vagem, e pode ser manejado em regime de monocultivo ou ainda em consórcio com outras espécies, especialmente gramíneas (Krause *et al.*, 2012).

As cultivares melhoradas do feijão buscam dar a arquitetura da planta caráter ereto, visando maior produtividade e ainda facilidade de colheita, permitindo o uso de mecanização intensiva (Abreu *et al.*, 2018). De acordo com Ribeiro *et al.* (2018) uma linhagem que obtenha alta produtividade deverá produzir em condições normais montante superior a 3000 kg ha⁻¹.

O melhoramento genético das cultivares de feijão visa ainda aumentar a resistência das plantas aos caracteres bióticos, tendo destaque pesquisas para combate às viroses e também de indução de resistência a estresses climáticos e solos mais pobres (Silva *et al.*, 2021).

Existem diferentes espécies de feijoeiro produzidas no território brasileiro, sendo que a espécie mais importante em termos econômicos é a denominada *Phaseolus vulgaris* L., que corresponde ao feijão comum, porém tem grande destaque ainda o feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) e o feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.) (Lovato *et al.*, 2018).

De acordo com Nemlí (2017) o feijão comum tem grande importância econômica no Brasil, sendo o maior produtor mundial deste grão, tendo Mianmar e Índia como grandes produtores de feijão da espécie *Vigna* (Faostat, 2021). Sendo que, tem sua produção quase completamente voltada para o abastecimento do mercado interno.

Trata-se da fabácea mais consumida no país na forma de grão, tendo sua importância atrelada ao seu alto valor nutricional, pois é fonte de proteínas, carboidratos e micronutrientes, o que promove uma alta demanda interna, de aproximadamente 3,5 milhões de toneladas, e que é abastecida de forma autossuficiente pelo Brasil (Embrapa, 2019).

De acordo com Jasper & Kuhn (2019) para a escolha da cultivar a ser utilizada alguns fatores devem ser levados em consideração, a saber: a adaptação ao clima, o hábito

de crescimento e resistências ou tolerância a estresses climáticos e ataques de insetos-pragas e doenças de ocorrência na região. Além disso, deve-se analisar o tipo de solo e a fertilidade disponível, bem como, fatores climáticos, como temperatura e disponibilidade hídrica.

Dentre as cultivares de feijão-comum, destacam-se os materiais pertencentes ao grupo mulatinho, sendo o feijão carioca predominando no grupo, e que apresenta grãos com tegumento de coloração bege com listras marrons, amplamente consumidas nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Na região que compreende o bioma Cerrado diversas áreas de cultivo se destinam a produção destes materiais (Francisco e Santos, 2018).

Um entrave à produção de feijão carioca no país diz respeito ao fato de que estes materiais possuem pouca aceitação no mercado internacional, o que acaba limitando o potencial de exportação para outros países consumidores (Embrapa, 2021). Desta forma, nos últimos anos começou-se a introduzir outros materiais de feijão comum com grãos maiores e tegumento colorido com destino ao mercado externo, como o *Dark Red*, o que levou o país ao recorde de exportações no ano de 2021, em que pela primeira vez se bateu a marca de mais de 3,0 milhões de sacas (Conab, 2021).

Quanto à densidade de plantio das cultivares de feijão comum disponíveis no mercado estas sofrem grande variação em função da arquitetura da planta a ser utilizada. As cultivares de feijão possuem quatro diferentes hábitos de crescimento, sendo classificadas como do tipo I: de porte ereto e crescimento determinado; do tipo II, que possuem crescimento indeterminado, com ramificação ereta e fechada; do tipo III, que apresentam crescimento indeterminado, com ramificação aberta ou do tipo IV que apresentam hábito trepador (Silva, 2005).

Dentre as cultivares de feijão comum existentes no mercado, uma que tem grande adaptabilidade às condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro e excelente resposta produtiva é a TAA Dama, desenvolvida pelo melhorista José Roberto Dutra de Menezes, responsável pela Terra Alta Agropecuária, e que teve o seu certificado de cultivar protegida em 2015 (MAPA, 2022).

As principais características dessa cultivar dizem respeito ao excelente potencial de armazenamento, pois a mesma mantém sua tonalidade clara até por um ano. Além disso, quando este feijão é irrigado responde a investimento à adubação pesada no plantio com duas coberturas, sendo a primeira aos 15 dias após a semeadura e outra em 15 dias após a primeira. Tem ainda tolerância à chuva na colheita (Seprotec, 2022).

Em relação às suas características agrônômicas tem ciclo de 85 a 90 dias, alto teto produtivo; classificado como tipo III de porte semi-prostrado (indeterminado), e recomendação de 220.000 sementes por hectare (11 sementes por metro linear). Além disso, tem altura da planta de 50 cm, forma do grão oblonga, cor bege claro com estrias claras e massa de 1.000 sementes de 280g. Tem resistência ao oídio, às bacterioses, à ferrugem e ao mosaico comum. E é moderadamente suscetível à mancha angular (Agranda, 2022).

3.2 Cultura da soja

O cultivo da soja (*Glycine max*) no Cerrado brasileiro desempenha um papel crucial na agricultura nacional, sendo uma das principais culturas em termos de área plantada e produção. Este bioma, caracterizado por suas savanas tropicais, oferece condições favoráveis para o desenvolvimento da soja, apesar dos desafios edafoclimáticos.

A soja é uma planta de ciclo anual e fotossensível, cuja fisiologia está intimamente ligada às condições ambientais. A fotossíntese, a fixação biológica de nitrogênio e a eficiência no uso da água são processos fundamentais para seu crescimento e desenvolvimento. Estudos indicam que a soja no Cerrado apresenta alta eficiência fotossintética devido à elevada incidência de luz solar (Miao *et al.*, 2018). Além disso, a fixação biológica de nitrogênio é favorecida pelas condições de solo, desde que bem manejado com calagem e inoculação adequada de rizóbios (Hungria *et al.*, 2015).

O Cerrado é caracterizado por um clima tropical sazonal, com uma estação chuvosa bem definida de outubro a março e uma estação seca de abril a setembro. A distribuição irregular das chuvas e as altas temperaturas são fatores que podem limitar a produtividade da soja (Álvares, 2013). A temperatura ideal para o crescimento da soja varia entre 20°C e 30°C, sendo que temperaturas acima de 35°C podem causar estresse térmico e afetar a produtividade (Barbosa *et al.*, 2020).

O desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições do Cerrado tem sido essencial para o sucesso do cultivo da soja na região. As cultivares modernas são selecionadas para resistência a pragas e doenças, eficiência no uso de nutrientes e adaptação às variações climáticas, de modo a promover alta produtividade e resistência a estresses abióticos e bióticos (Barbosa *et al.*, 2020).

A produtividade da soja no Cerrado tem aumentado significativamente nas últimas décadas, graças a avanços tecnológicos e práticas de manejo sustentável. Segundo a

Embrapa Cerrados (2024), a produtividade média da soja no Cerrado é de cerca de 3.300 kg ha^{-1} , com potencial para alcançar mais de 4.000 kg ha^{-1} em áreas bem manejadas.

A soja é uma das principais commodities agrícolas do Brasil, representando uma parcela significativa das exportações. O Cerrado, como principal região produtora, contribui enormemente para a economia agrícola do país. Em 2024, o Brasil exportou mais de 97 milhões de toneladas de soja, gerando receitas superiores a 30 bilhões de dólares (Canal Rural, 2024). O mercado da soja é altamente influenciado por fatores externos, como a demanda chinesa e as políticas comerciais internacionais (Figueira e Galache, 2023).

A cultivar B5830 CE, desenvolvida pela empresa Brevant, é uma das cultivares de soja adaptadas às condições do Cerrado brasileiro. Esta variedade destaca-se por sua alta produtividade e adaptação às condições climáticas adversas da região. Apresenta características fisiológicas que favorecem seu desenvolvimento em condições adversas, como alta eficiência fotossintética e uma robusta capacidade de fixação biológica de nitrogênio. Possui um sistema radicular bem desenvolvido, o que melhora a absorção de água e nutrientes, aumentando a tolerância à seca (Brevant, 2024).

Possui altura média de 84 cm, tipo de crescimento indeterminado e tolerante ao acamamento. É recomendada para solos de média a alta fertilidade, tendo tolerância moderada ao nematoide de cisto e alto teto produtivo, sendo que em condições de bom manejo em relação às condições edafoclimáticas favoráveis são esperadas produções superiores a 4000 kg ha^{-1} (Brevant, 2024).

Possui a tecnologia de melhoramento de sementes Conkesta E3®, que combina genética de alta produtividade com a possibilidade de um melhor manejo de plantas daninhas – já que permitem a aplicação de diversos herbicidas em pós-emergência, como o 2,4-D, o glifosato e o glufosinato de amônio. Além disso, contam com 2 proteínas Bt (Cry 1F e Cry 1Ac) para proteger a lavoura de soja contra as principais lagartas que atacam a cultura, como as do gênero *Spodoptera sp* (Brevant, 2024).

3.3 Fertilidade, manejo do solo e tratamento de sementes de feijoeiro e soja

Tanto o feijoeiro como a soja são plantas de ciclo curto, que geralmente se encerra em um período de até 140 dias. Devido a isso, a demanda por fertilidade de solo é alta, e deve-se evitar que se interrompa o fornecimento dos minerais essenciais em qualquer parte do ciclo fenológico, para que não ocorra perda de produtividade (Carvalho e Nascente, 2018).

Além disso, o sistema radicular é composto por raiz pivotante, que se mantém em níveis subsuperficiais, principalmente para o feijoeiro, o que denota uma especial atenção ao manejo de fertilidade dos solos na camada de 0,20 m de profundidade (Fageria *et al.*, 2011).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias para o plantio das cultivares melhoradas houve também uma melhora no manejo dos solos tropicais, derivada da utilização de técnicas conservacionistas, como rotação de culturas, calagem, gessagem, sistema de plantio direto na palha e sistemas integrados como integração lavoura-pecuária, adubação equilibrada com macro e micronutrientes, uso de fertilizantes químicos e/ou orgânicos, além de adubos verdes (Francziskowski *et al.*, 2019; Caires e Alleoni, 2013).

Para obter-se melhor desenvolvimento do feijoeiro e da soja em clima tropical faz-se necessária a cobertura do solo com material em decomposição, ou seja, cobertura morta, resultante da dessecação de cultivos anteriores. Nestas condições de manejo do solo, este tende a armazenar mais água, além de melhorar os atributos químicos por meio da ciclagem de nutrientes e ainda propiciar melhores atributos físicos, permitindo um menor nível de compactação (Barbieri *et al.* 2020).

A palhada nos horizontes superficiais do solo, em quantidades adequadas, altera a relação solo-água, de modo a minimizar a evaporação, além de reduzir a taxa de evapotranspiração das culturas, principalmente nos estádios iniciais, onde o dossel dessas ainda não cobre totalmente o solo. A manutenção desta cobertura irá propiciar a redução da frequência de irrigação, aumentando o turno de rega, o que gera economia direta nos custos de operação e manutenção do sistema de irrigação utilizado (Leite *et al.*, 2017).

Como medida para aumentar os níveis de fertilidade do solo indica-se o uso do remineralizador de solo denominado PR, principalmente os solos intemperizados, comumente encontrados no bioma Cerrado (Duarte *et al.*, 2021).

A manutenção do pH do solo no intervalo de 6 a 7 é fundamental para a melhor absorção dos nutrientes na solução do solo, e deve ser controlada nos solos do Cerrado, que comumente são ricos em alumínio e apresentam caráter ácido (Fageria e Nascente, 2014).

Segundo a FAO (2017) alguns fatores influenciam positivamente ao aumento de degradação dos solos, tendo destaque a qualidade e a profundidade da capa do lençol freático, além das características físicas de cada solo, do tipo de irrigação utilizado, bem como a presença ou ausência de drenagem, natural ou artificial. A disponibilidade do

recurso hídrico e a qualidade dessa oferta são fundamentais para as reservas químicas dos solos e ainda para o impedimento ou avanço de áreas com alta concentração de sais impróprios aos cultivos agrícolas.

Em relação à profundidade de semeadura esta tem papel fundamental para a eficiência da germinação das sementes, bem como a correta emergência das plantas, e sofre influência direta dos fatores umidade e temperatura do solo. Deve-se verificar o tipo de solo a ser semeado, principalmente no tocante a composição estrutural deste, sendo que comumente a profundidade ideal estará associada à valores próximos a 5 cm, tanto para o feijoeiro como para a soja (Balestrin *et al.*, 2020).

Outro importante fator de manejo diz respeito a necessidade de se realizar o tratamento das sementes a serem utilizadas. Este tratamento garante proteção inicial contra os ataques de pragas de solo e de doenças fúngicas (Balestrin *et al.*, 2020), e deve ainda ser acrescido da inoculação de bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Bradyrhizobium*, além da co-inoculação com *Azospirillum* e cianobactérias (Horácio *et al.*, 2020)

Consonante a inoculação indica-se ainda o uso de fungos fitófagos que se alimentam de fungos patogênicos do feijoeiro e soja, para tanto, recomenda-se o uso do *Trichoderma*, tanto na fase inicial, juntamente com o tratamento de sementes, como ainda fornecido via barra de pulverização nos estádios vegetativos e reprodutivos do cultivar (Beladeli *et al.*, 2021).

Por pertencer ao grupo de plantas C3, o feijoeiro e a soja possuem um processo para captação de CO₂ e produção do processo metabólico de fotossíntese de forma menos eficiente, quando comparados aos cultivos C4 e CAM, o que demanda maior gasto energético. Deste modo, o seu desenvolvimento está diretamente atrelado ao oferecimento contínuo de radiação solar, calor, e gás carbônico. O processo de respiração consumirá grande reserva energética, sendo necessário aporte frequente de água (Braga *et al.*, 2021).

Para alcançar altas produtividades nos cultivos do feijoeiro e soja é importante o advento de técnicas que promovam a manutenção dos recursos naturais de solo e água e que otimizem as possibilidades de uso desses insumos, priorizando as práticas conservacionistas, que viabilizem o armazenamento de água nestes solos, bem como a manutenção das características de alta fertilidade natural, boa porosidade, e permeabilidade, matéria orgânica abundante e a manutenção da microbiota deste sistema (Lopes e Guilherme, 2007).

O cultivo destas leguminosas requer ainda a inoculação das sementes em pré-plantio, visando a reposição total ou parcial do nitrogênio ao sistema produtivo. Para o feijoeiro recomenda-se a inoculação com a espécie *Rhizobium tropici* e para a soja a espécie *Bradyrhizobium japonica*. Sendo que em ambos os casos o seu uso está atrelado ao aumento de produtividade e crescimento no sistema radicular e aumento do volume do solo explorado (Costa *et al.*, 2023).

3.4 Necessidades hídricas para o feijoeiro e a soja

Para se avaliar a disponibilidade hídrica que o feijoeiro e a soja irão demandar, em qualquer que seja o sistema de irrigação a ser adotado, deve-se objetivar a economicidade do bem público: água, recurso natural renovável que precisa ser consumido dentro de parâmetros que permitam a sua constante recarga. Deste modo, para se implementar um circuito de captação de água é importante que seja dimensionada a sua taxa de recomposição, bem como sua taxa de exploração, de forma que se balizem as quantidades de água captada do manancial e que a ele não irá retornar (uso consuntivo), bem como a quantidade de água que foi captada e que retorna ou permanece no manancial (uso não consuntivo), a fim de promover a conservação e manutenção dos ecossistemas (Pereira *et al.*, 2019).

As diferentes espécies e cultivares do feijoeiro possuem exigências e tolerância diversas a falta de água. O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), em seus cultivares carioca, tem ao longo do seu ciclo exigência hídrica em torno de 300-500 mm de água, sendo que esta deve ser bem distribuída, para que não falte em nenhum estágio de desenvolvimento do cultivo. A época que necessita de maior lâmina de água e menor turno de rega compreende o período de enchimento de grãos, sendo que a ausência de irrigação neste momento pode levar a baixas produtividades (Sales *et al.*, 2017).

Martins *et al.* (2017) fizeram experimento no estado do Espírito Santo para verificar se o feijoeiro seria menos responsivo em termos produtivos se houvesse estresse hídrico em algum dos seus estádios fenológicos. Os autores utilizaram a tensão para determinação da capacidade de campo em dois níveis e déficit hídrico no solo em quatro níveis, com lâminas de água que corresponderam a 40%, 60%, 80% e 100% dos níveis de água irrigação ideais e obtiveram queda acentuada de produtividade e desenvolvimento da planta quando se ofertou menos de 60% da lâmina de água necessária para suprir as necessidades de rega do solo, principalmente na época do enchimento de grãos.

Estudos indicam que em condições de estresses hídricos ou térmicos à época da germinação das sementes incorrerá em queda no estande final, uma vez que se aumenta a probabilidade de estas serem atacadas por microrganismos do solo. A insuficiência hídrica neste momento é considerada uma das causas mais comuns da baixa emergência das plântulas no campo pós plantio (Campos *et al.*, 2021). Sendo que, de acordo com Paterniani *et al.* (2019) e Ferrão *et al.* (2016), diferentes cultivares de feijão podem ter diferentes tolerâncias à falta de água nas fases iniciais de cultivo.

Ao longo do ciclo de vida do feijoeiro, é comum a ocorrência de períodos de deficiência hídrica, devido à irregularidade da precipitação, em que comumente verificam-se anos com alta precipitação seguidos de anos com precipitação deficitária. Esta instabilidade, de acordo com Osti *et al.* (2019) faz com que seja necessária à sua irrigação, o que garantirá uma boa resposta produtiva. Estes autores orientam que embora a irrigação deva ser fornecida, esta deve ser bem manejada no sentido de propiciar a relação econômica mais vantajosa, e que está nem sempre corresponderá a máxima produtividade.

O déficit hídrico acontece quando existe uma quantidade inferior de água disponível na solução de solo para abastecer os processos fisiológicos do cultivar na cadeia sistema-solo-planta (SOUZA, 2017). Este processo tende a promover nos cultivos uma menor perda de água, diminuindo as taxas de transpiração, o que pode levar a um processo evolutivo em busca de adaptar a quantidade de água disponível, porém não se assegura que a planta manterá os níveis produtivos (Avramova *et al.*, 2017).

De acordo com Souza *et al.* (2013) o déficit hídrico é mais danoso em três momentos do ciclo fenológico do feijoeiro, sendo estes: indução floral, reprodução e enchimento de grãos.

Viçosi *et al.* (2017) realizaram um trabalho para avaliar se e como as condições de baixa disponibilidade de água afetariam a germinação do feijão e obtiveram como resultado uma diminuição do comprimento da radícula e do hipocótilo para o cultivar, além de queda no número de sementes germinadas.

Em experimento promovido por Aleman e Mignacca (2015) no oeste de São Paulo, em região de Cerrado, foram fornecidas diferentes lâminas de irrigação para o feijão BRS Pérola. Os autores analisaram características de produtividade utilizando seis lâminas de irrigação, sendo estas: 25%, 50%, 75%, 100%, 125% e 150% da Etc, e concluíram que as melhores respostas foram encontradas para a lâmina de 75% da ETc. Notou-se ainda que a falta de água levou a maior síntese de um composto (aminoácido) denominado Prolina,

que está presente nas folhas frescas e tem capacidade de atuar como osmorregulador, o que é útil em situações de estresse hídrico, para equilibrar as oscilações fisiológicas da planta e manter as funções normais, durante o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

Em relação à soja a irrigação é um fator crucial para a sua produtividade e qualidade. A demanda por água varia ao longo do ciclo da cultura e é influenciada por fatores climáticos, tipo de solo e práticas de manejo.

A soja requer diferentes quantidades de água em suas fases de desenvolvimento, desde a germinação até a maturação. Estudos indicam que a necessidade hídrica total da soja varia de 450 a 800 mm durante o ciclo completo de crescimento, dependendo das condições climáticas e do solo (Farias, 2007).

Para promover uma germinação rápida uniforme, a temperatura média do solo deve estar em torno de 25°C, na profundidade da sementeira. Semeaduras com temperaturas de solo menores do que 20°C ou maiores do que 30°C podem diminuir a germinação e a emergência das plântulas (França-Neto *et al.*, 2016).

O grão de soja precisará apresentar pelo menos 50% do seu peso total em água no momento da germinação, o que demandará que o solo esteja entre 50% a 85% da sua capacidade de campo. Durante o crescimento vegetativo, que inclui o desenvolvimento foliar e a formação da estrutura da planta, a soja requer aproximadamente 40-50% da sua necessidade hídrica total. A disponibilidade de água nesta etapa é crucial para o desenvolvimento do sistema radicular e a absorção de nutrientes (Silva *et al.*, 2022).

No momento do florescimento e frutificação a soja exige um suprimento contínuo e adequado de água durante o florescimento e a frutificação, representando cerca de 30-35% da necessidade hídrica total. O déficit hídrico nesta fase pode resultar em queda de flores e vagens, impactando negativamente a produtividade (Baiaco *et al.*, 2023).

Durante a maturação, a demanda por água diminui, sendo necessário apenas cerca de 10-15% da necessidade hídrica total. No entanto, o estresse hídrico deve ser evitado para assegurar uma boa qualidade de grãos (Pinto Rossatto *et al.*, 2022).

Diversas pesquisas demonstram a necessidade do uso de indicadores da eficiência do uso de água para fomentar uma análise da resposta dos cultivos às diferentes condições de disponibilidade hídrica. Essas ferramentas tendem a correlacionar a produtividade final com a quantidade de água aplicada ou evapotranspirada pela cultura durante o seu ciclo de vida (Beltrão Junior *et al.*, 2017).

Outras implicações do déficit hídrico prolongado podem aparecer, como exemplo observa-se que nesta situação ocorre uma seca nos vasos do xilema das plantas e uma

diminuição da condutância hidráulica, uma vez que existe além da falta de água disponível uma baixa utilização das aquaporinas (proteínas responsáveis pelo transporte de água para dentro das raízes). A ausência de água no xilema, nos traqueídeos e elementos de vasos, leva a formação de bolhas de ar (embolismo) ou a interrupção do fluxo ou da cavitação em decorrência do estiramento da coluna d'água (VADEZ, 2014).

Silva *et al.* (2020) testaram o manejo de irrigação da soja no período chuvoso em quatro regiões e três estados do bioma Cerrado (GO, BA e TO). Os autores testaram o manejo de irrigação de sequeiro, fornecendo água apenas no período reprodutivo e durante todo o ciclo do cultivo e observaram que embora os cultivos que foram irrigados durante todo o ciclo tenham tido melhor produtividade final, os cultivos irrigados somente no período reprodutivo apresentaram mais EUA, demonstrando que a irrigação deficitária pode ser economicamente mais viável e responsiva em produtividade.

Lopes *et al.* (2023) avaliaram a influência do manejo da irrigação deficitária ao longo de diferentes estádios de desenvolvimento em três cultivares de soja nas condições edafoclimáticas do cerrado no estado do Piauí, para parâmetros morfológicos altura das plantas, número de folhas e a fitomassa seca total da parte aérea. Os autores proveram o déficit hídrico de 50% da ET_c de cada cultivar e observaram queda nos parâmetros analisados para todos os cultivos sob regime de estresse hídrico.

Neste sentido, Gomes e Roland (2018) observam que para evitar prováveis efeitos negativos causados pelo déficit de água no solo em períodos de estiagem, se deve introduzir a irrigação complementar no sistema produtivo, o que vai assegurar uma boa resposta produtiva, a depender da espécie a ser cultivada. Todavia, este fornecimento precisa ser pautado no acompanhamento das condições de campo, de modo que se avalie os níveis de umidade, para que, nesse caso, também possa ser definida a lâmina de água mais adequada de reposição para atender a demanda hídrica das plantas.

De acordo com Furquin e Abdala (2019) por meio das técnicas de irrigação é possível deslocar o insumo água no tempo e no espaço, de modo a possibilitar os ajustes dos recursos naturais disponíveis em dada região às demandas agrícolas existentes. Para suplementar essa falta de água em períodos secos ou ao longo de todo o ano são indicadas estratégias de cultivo nas áreas de produção agropecuária.

3.5 O pó de rocha como remineralizador do solo

O PR é um insumo utilizado com a finalidade de condicionador de solo e que promove o aumento de fertilidade deste, sendo classificado como um remineralizador de solo. A sua utilização em terras agrícolas é denominada rochagem e ocorre por meio do

proveniente de rochas e ou minerais como fornecedores dos nutrientes necessários para as plantas (Writzl *et al.*, 2019).

Diversos são os materiais de origem destas rochas utilizadas com finalidade agrícola, portanto, a escolha da rocha utilizada deverá levar em conta a mineralogia e deficiência do solo a ser corrigido, bem como as exigências dos cultivos estabelecidos, para que ocorra o maior aproveitamento do material implementado (Souza, 2014).

É de se ressaltar que o PR além do caráter sustentável apresenta outra vantagem em relação aos adubos químicos, pois este tem considerável valor de mercado mais baixo que outros fertilizantes e por isso onera de forma menos significativa os custos de produção agrícola (Bertoldo *et al.*, 2015).

De acordo com Ramos *et al.* (2021) várias características de mercado destacam o PR como uma ferramenta viável à atividade agrícola, uma vez que além do custo baixo em relação a outros fertilizantes, existe ainda uma grande facilidade de aplicação e uma ampla gama de rochas que podem ser destinadas a esse fim. Estes autores explicam que existe a disponibilidade de diversas matérias primas que dão origem a este subproduto, sendo que, este insumo, além de prover grande quantidade de macronutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, disponibiliza micronutrientes essenciais e benéficos, como é o caso do silício. Além disso, os remineralizadores destacam-se como agentes úteis à recuperação de áreas degradadas e ao sequestro de carbono atmosférico.

Existem diversos tipos de PR disponíveis no mercado, a escolha do material dependerá da necessidade de correção do solo. Os principais materiais de origem utilizados são: fonolito (rocha vulcânica composta por feldspato potássico e feldspatoides); kamafugito (rocha ígnea composta por leucititos, olivina melilitos, alguns lamprófiros ultrabásicos e alguns kimberlitos micáceos); biotita xisto (composta por brita e areia artificial); micaxisto (rocha metamórfica composta por quartzo e mica); além das argilas que liberam micro partículas de rocha de conformação 1:1 e 2:1 e o silito glauconítico (rocha sedimentar rica em glauconita) (Velo, 2020).

O PR de origem basáltica é amplamente utilizado, sendo que este se origina de uma rocha magmática de cor preta, e tem em sua composição quartzo, mica e feldspato. Este material advém de uma rocha básica, facilmente intemperizável e com alta disponibilidade de cátions. Disponibiliza altos teores de silício e contém teores relativamente baixos de cálcio, além de traços de potássio, fósforo e magnésio (Kautzmann *et al.*, 2013).

Destaca-se ainda na região do cerrado mineiro e goiano o remineralizador cuja matéria prima advém da rocha micaxisto carbonática. Os micaxistos são rochas metamórfica com protólito de origem sedimentar e fontes de potássio (Blanck 1912, Barshad 1954). Em relação aos trabalhos desenvolvidos com seu uso, tem-se encontrado resultados para a disponibilidade de potássio (Resende *et al.*, 2006; Manning *et al.*, 2010; Guelfi-silva *et al.*, 2014), além de ter sido verificado maior desenvolvimento radicular (Resende *et al.*, 2006), aumento na matéria seca na parte aérea (Duarte *et al.*, 2012) e ainda aumento de produtividade final (Batista *et al.*, 2013).

De acordo com Taylor *et al.* (2021) a disponibilidade do PR quando comparada aos fertilizantes ocorre de maneira mais lenta, com efeitos potenciais a médio e longo prazo. Alguns experimentos demonstram incrementos de fertilidade que podem ser sentidos até décadas após a sua incorporação. Experimento de (Aarnio *et al.*, 2003) demonstrou que uma única aplicação de biotita de intemperismo bastante lento misturada com apatita melhorou quimicamente um espodossolo por até 10 anos, sendo que efeitos incipientes no pH do solo só começaram após 2 anos da aplicação.

Independentemente do material de origem, o PR caracteriza-se por ter lenta liberação de nutrientes no solo e, por isso, baixo risco de lixiviação. Deve-se considerar ainda que este material demonstra um equilíbrio trofobiótico no fornecimento dos nutrientes; além de não acidificar nem salinizar o solo, o que promove correção de pH; e de proporcionar a diminuição da fixação do fósforo, o que pode ser explicado pela presença da sílica em sua composição (Dalcin *et al.*, 2018).

De acordo com Brito *et al.* (2019) os remineralizadores distribuídos por meio de rochagem tem a vantagem de fornecer nutrientes disponibilizados de forma mais homogênea quando comparado aos fertilizantes químicos solúveis convencionais e de atuar na correção e condicionamento do crescimento continuado dos cultivos, promovendo uma atuação de “rejuvenescimento” nos solos intemperizados. Estes autores ainda discutem um outro potencial benefício que seria a melhora no desempenho e dinâmica dos fungos micorrízicos no solo, que tenderia a aumentar a absorção de nutrientes pelas raízes.

Marques e Marques (2013) destacam o caráter sustentável dos remineralizadores de solo, que mantém as premissas ecológicas e socialmente corretas ao longo do seu manejo, uma vez que tal método não promove contaminações, nem a necessidade de processos químicos, ao contrário, existe uma vertente para que tal matéria prima seja reaproveitada de rejeitos minerários que ficariam expostos no ambiente por um longo período de tempo.

Em relação aos subprodutos da mineração, estes são basicamente minerais de silicato compostos principalmente por quartzo, plagioclásio, piroxênio e feldspato, mas podem variar consideravelmente em sua composição e disponibilizar diversos nutrientes essenciais para as plantas quando aplicado aos solos (Medeiros *et al.*, 2021).

É de se ressaltar que os potenciais benefícios do material estão atrelados à algumas variáveis, como: a granulometria, as atividades dos microrganismos presentes no solo e o pH deste solo (Osterroht, 2003). Além disso, deve-se relacionar as interações positivas do PR ao tipo de solo, às espécies de plantas e suas necessidades, e ainda a mineralogia do material de origem. Outro ponto a ser verificado é a quantidade deste insumo utilizada para correção em um solo e fatores setoriais que envolvem ainda a duração do tempo de aplicação e ainda possíveis interações com a microbiota deste solo (Bamberg *et al.* 2017).

Em relação à granulometria, experimento de Priyono e Gilkes (2008) demonstrou que o PR de pequena granulometria, que passou por um processo de moagem de alta energia, promoveu melhoraria na cinética de dissolução consideravelmente, uma vez que, o pó de feldspato que passou por processo de moagem de alta energia por dez minutos teve uma taxa de dissolução semelhante à demonstrada pelo K_2SO_4 .

Almeida Júnior *et al.*, (2020) propuseram um experimento para verificar a viabilidade do uso do pó rocha basáltico para adubação do milho em substituição ao adubo químico. Os autores utilizaram diferentes doses deste insumo e verificaram que com a dose de 3 t ha^{-1} houve ganhos consideráveis nas variáveis analisadas (população de plantas, produtividade por quilograma e massa de mil grãos). Embora o melhor resultado tenha sido na maior dosagem não necessariamente esta seja a melhor opção, uma vez que encareceria muito o sistema de produção. Todavia os autores são categóricos em afirmar que neste estudo o PR se mostrou viável como alternativa ao uso dos fertilizantes químicos.

Alovisi *et al.*, (2021) testaram o uso do PR em conjunto ou em substituição ao fertilizante convencional para a soja. Os autores separaram parcelas com e sem adubação com NPK e outras com uso apenas do PR. Neste experimento, devido a velocidade do ciclo da soja os autores concluíram que para as variáveis analisadas: altura de plantas, diâmetro do coleto, massa de mil grãos e produtividade, os tratamentos que receberam a adubação química tiveram melhor desempenho. O estudo atribuiu a pequena liberação dos nutrientes do pó de basalto no período do experimento como fator limitante ao uso do material como fonte de nutrientes às plantas.

De forma similar, Burbano e Theodoro *et al.* (2020) propuseram estudo para cultivos de ciclo anual e mais curto (feijoeiro, rúcula e lentilha). As condições de clima e solo são descritas como pertencentes ao bioma Cerrado. Os autores mantiveram o experimento pelo período de cinco safras consecutivas. Os tratamentos utilizaram o PR, fertilizantes químicos, fertilizantes orgânicos e fertilizantes orgânicos com PR. Neste estudo os autores encontraram incremento produtivo nas duas primeiras safras utilizando o fertilizante mineral formulado com NPK, porém a partir da terceira safra as melhores respostas foram observadas utilizando o PR em conjunto aos fertilizantes orgânicos. Este estudo demonstra a necessidade dos remineralizadores reagirem no solo em um espaço de tempo anterior ao estabelecimento dos cultivos, a fim de demonstrarem um maior potencial de produção.

Duarte *et al.*, (2021) avaliaram diferentes fontes de adubação, fertilizante mineral, PR e biofertilizante, na cultura do feijoeiro, na cidade de Ipameri – GO. Nas condições em que o experimento se desenvolveu, os autores concluíram que a aplicação de diferentes fontes de fertilizantes não alterou significativamente os principais componentes de produção, a produtividade e a qualidade de sementes na cultura do feijoeiro, de modo que todos os métodos atingiram resultados satisfatórios.

3.6.1 Legislação, interferência e disponibilidade do pó de rocha na composição química do solo e efeito nas plantas

A lei nº 12.890/2013 (BRASIL, 2013) institui o uso do remineralizador como promotor de aumento de fertilidade do solo, de forma que tal medida regulatória delimita as possibilidades de uso, além de otimizar a comercialização do insumo. O MAPA, por meio da IN nº 05 de 2016, estipula os percentuais mínimos de especificação e garantias que devem ser comprovadas por análises geoquímicas e mineralógicas, como soma de bases dos óxidos presentes, além de promover seguridade de uso, uma vez que delimita os percentuais máximos de elementos potencialmente tóxicos. Devem ainda ser fiscalizados o pH de abrasão, além do conteúdo de sílica livre (quartzo), e da granulometria dos materiais a serem comercializados (BRASIL, 2016).

De acordo Toscani e Campos (2017) alguns dos minerais com grande perspectiva para esse uso são encontradas em rochas de origem basálticas e fosfatadas (fosforito e dolomito fosfatado), que liberam quantidades significativas de macronutrientes no solo, com destaque para P, Na, Ca e Mg; e ainda apresentam minerais de argila com estrutura 2:1. Esses autores obtiveram por meio de estudo experimental resultados que comprovam

aumento na fertilidade dos solos já no primeiro ano de aplicação destes minerais. Ainda concluíram que o uso combinado desses remineralizadores de solo ao calcário produz efeito produtivo superior ao alcançado com a correção tradicional, utilizando fertilizantes solúveis, que além de mais onerosos, têm potencial contaminante e possibilidade finita de renovação.

O PR não se constitui em material solúvel em água, sendo assim, reagirá no solo por meio do biointemperismo promovido pela rizosfera das plantas e os microrganismos.

Para tanto, deve-se prover o contato dos minerais de rochas moídas, o que promove a liberação gradual dos nutrientes no solo, e que acarretará diminuição das perdas por lixiviação e maior fixação e disponibilidade do produto aplicado (Melamed *et al.*, 2007).

De acordo com Theodoro *et al.* (2013) o PR pode reagir e liberar nutrientes no solo por um período de até cinco anos após a sua incorporação. Um outro diferencial nesse material seria o fato que os minerais não absorvidos pelas plantas fiquem em forma de estruturas cristalinas na estrutura do solo, o que promove a liberação e solubilização mais lenta na solução do mesmo (Ramos *et al.* 2021). Essas características tornam esse insumo de grande viabilidade econômica, além de ser ambientalmente correto, permitindo maior sustentabilidade aos sistemas produtivos (Islam *et al.* 2019).

Sendo proveniente de rochas silicatadas, o PR pode dispor aos solos todos os minerais essenciais necessários ao estabelecimento dos cultivos, com exceção do nitrogênio (Swoboda *et al.*, 2022).

O PR tem potencial de promover a liberação do elemento benéfico silício na solução de solo. A presença desse micronutriente nos solos é indicativo de maior resposta no desenvolvimento dos cultivos agrícolas, principalmente cultivos anuais. De acordo com Medeiros *et al.*, (2021) o silício originalmente presente nos solos tropicais tende a ser perdido por lixiviação nos horizontes superiores do solo.

De acordo com Alovisei *et al.*, (2020) e Souza *et al.*, (2015) o silício confere um caráter protetor na superfície dos cultivos, uma vez que a parede celular se torna mais rígida e que os torna mais resistentes a ataques de insetos-pragas e doenças e também pode evitar perdas de água excessivas para o ambiente.

De acordo com Camargo (2016) a capacidade do silício de prover maior resistência das plantas a ataques de insetos-pragas, doenças e ainda a estresses hídricos é devido a sua capacidade de promover duas barreiras (física na parede da epiderme e química na parede celular) nos cultivos que o contém, porém, este efeito é verificado quando da

aplicação do silício solúvel, existindo uma lacuna para a verificação de tal efeito no silício de outras fontes, como o PR.

Wenneck *et al.*, (2021) explicam que quando esse micronutriente é fornecido para as plantas em ambiente similar ao Cerrado brasileiro, as plantas tendem a absorver e acumular tal mineral nos órgãos de transpiração, onde forma-se uma dupla camada silicatada com função de diminuir a abertura dos estômatos e consequentemente frear a evapotranspiração dos cultivos ao longo do seu ciclo de vida.

Outro mecanismo que conferiria resistência às plantas seria em função da promoção da biossíntese de quantidades consideráveis de compostos de defesa orgânica promovida pelo silício (Haynes, 2014).

Uma boa fonte de silício, deve obrigatoriamente apresentar altos teores desse mineral na forma solúvel, além de promover alta reatividade, um baixo custo, e liberar altos teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de Magnésio (MgO), e disponibilizar baixos teores de metais pesados, quesitos esses onde o PR obtém excelente resposta (Rodrigues, 2017).

3.6.2 Alterações na geoquímica dos solos com o provimento de pó de rocha

De acordo com Schlesinger e Bernardt (2013) o intemperismo dos silicatos e a consequente liberação dos elementos primários constituintes destas rochas é um processo geoquímico primordial para moldar o ambiente terrestre e disponibilizar nutrientes aos solos.

De acordo com van Straaten (2006) o uso do PR é indicado para solos tropicais, como latossolos e argissolos, que já passaram por intenso intemperismo. Isso se deve às baixas reservas de minerais remanescentes nestes solos, onde a maioria dos minerais primários foram reduzidos a oxi-hidróxidos e argilas 1:1, o que caracteriza solos com baixa CTC e pH ácido (Weil e Brady, 2017). Por outro lado, as propriedades físico-químicas destes solos permitem que tenham rápida dissolução do PR (Bamberg *et al.*, 2017).

De acordo com Ramezani *et al.*, (2015) a mineralogia do solo é fundamental para que o PR apresente uma resposta significativa quando incorporado nos solos tropicais. Experimento destes autores concluiu que quando o PR tem mineralogia semelhante à do solo que o receberá não são sentidos efeitos positivos com seu uso, uma vez que o equilíbrio iônico do solo seria alcançado entre a solução e os minerais nativos, e que acrescentando rochas da mesma mineralogia provavelmente tal equilíbrio não seria

alterado. De modo contrário, utilizando materiais com mineralogia e pH diversos, estes autores conseguiram encontrar consideráveis incrementos produtivos.

De acordo com Sanchez *et al.*, (2019) estudos que visem identificar o efeito da incorporação do PR devem incluir além do tipo de solo, dados físico-químicos e propriedades como textura, mineralogia e pH deste solo.

De acordo com Manning (2018), é importante que se determine a dinâmica de liberação dos nutrientes disponíveis no mineral de rocha, pois isto facilita a compreensão dos processos de intemperismo e alteração que estes minerais sofrerão ao longo do tempo.

Em consonância ao exposto acima, cabe dizer que as taxas de dissolução mineral podem ser influenciadas pela presença de ligantes orgânicos, sendo que tais ligantes podem se unir a cátions metálicos em solução, ou formar complexos na superfície mineral que também aumentariam as respostas destas taxas de dissolução mineral. Os efeitos na dissolução são fortemente dependentes do ligante, além da espécie mineral e do pH do meio (Van Noort *et al.*, 2018).

De acordo com Dalmora *et al.*, (2019) muitos estudos que encontram baixas taxas de dissolução para o potássio (K) por meio do uso do PR podem estar ligados não ao material de origem, mas ao tipo de extrator utilizado para se avaliar a cinética, bem como a solubilidade, de tais materiais nas dissoluções realizadas. Uma metodologia mais assertiva poderia considerar o uso de materiais que aproximem às condições meteorológicas naturais, incluindo o potencial para formar gradientes de concentração na fase líquida, e limitando colisões nas partículas, para evitar de se mascarar as camadas lixiviadas ou precipitadas que podem se formar nas partículas durante o processo de intemperismo nas áreas agrícolas.

Ainda de acordo com Dalmora *et al.*, (2019) que verificou o potencial de dissolução de um mineral de rocha denominado andesita com dois extratores ácidos encontrando alta velocidade de dissolução nas condições propostas, o bom resultado do seu experimento pode ser atribuído à constituição desta rocha, que possui alto teor de laumontita, um mineral do grupo zeólito que está relacionado a formação de vesículas de enchimento neste mineral e que conferem à rocha uma característica alcalina e leva à alta capacidade de troca catiônica no solo, propriedade tal que proporciona a maior troca de nutrientes entre as partículas minerais e solo/água/raízes dos cultivos.

O alto estado de intemperismo das rochas no experimento de Dalmora *et al.*, (2019) pode ser confirmado pela presença do mineral de rocha hematita nos sub-produtos da dissolução. Verificou-se a presença de minerais da classe dos feldspatos com alta

proporção de cálcio e sódio, além de baixa resistência ao intemperismo, o que o torna ainda fonte alternativa ao calcário agrícola. Adicionalmente, os piroxênios como o diopsídio pode liberar Mg, Fe e Ca, e formar novos minerais.

3.6.3 Fatores que influenciam a cinética de absorção do pó de rocha

De acordo com Swoboda *et al.* (2022) alguns parâmetros têm correlação direta com a velocidade da dissolução (intemperismo) e disponibilidade dos minerais presentes no pó rocha, como o pH da solução de solo, a intensidade e fluxo de água e ainda a temperatura do ambiente ao longo do tempo. Além destes parâmetros diretos haveria ainda a influência da superfície reativa do próprio mineral que pode sofrer variações devido ao encapsulamento em precipitação mineral secundária ou ainda pela depleção de cátions em áreas superficiais, que reagiriam como camadas protetoras nesses minerais e que limitariam a dissolução.

De maneira complementar Maher (2010) afirma que as taxas de intemperismo natural sofrem ainda interferência direta do tempo, sendo que, em períodos maiores tendem a ir decrescendo progressivamente.

De acordo com Swoboda *et al.* (2022) em relação a velocidade da dissolução do PR na solução de solo, na maioria dos casos ocorre de forma lenta por meio do intemperismo, entretanto, existem dois estágios iniciais do processo de intemperismo que podem ser diferenciados. O primeiro caso diz respeito a possibilidade da troca superficial de íons de K^+ por íons de H_3O^+ , onde os primeiros íons poderiam ser prontamente liberados na solução do solo. No segundo caso é levantada a possibilidade de que sejam catalisados no momento da hidrólise prótons de Si-O e Al-O que também seriam mais rapidamente disponibilizados na solução de solo.

Ciceri e Allanore (2015) complementam a hipótese acima por meio de estudo onde encontraram evidências do fenômeno proposto no primeiro caso, com especial velocidade de dissolução para estruturas que tinham como material primário fontes de feldspatos. Neste sentido estudo de Manning (2018) diz que esse intemperismo mais acelerado se correlacionaria com processos microbiológicos providos pelo sistema solo-planta.

Na Figura 01 pode-se evidenciar os fatores mais relevantes que influenciam na cinética do intemperismo do PR.

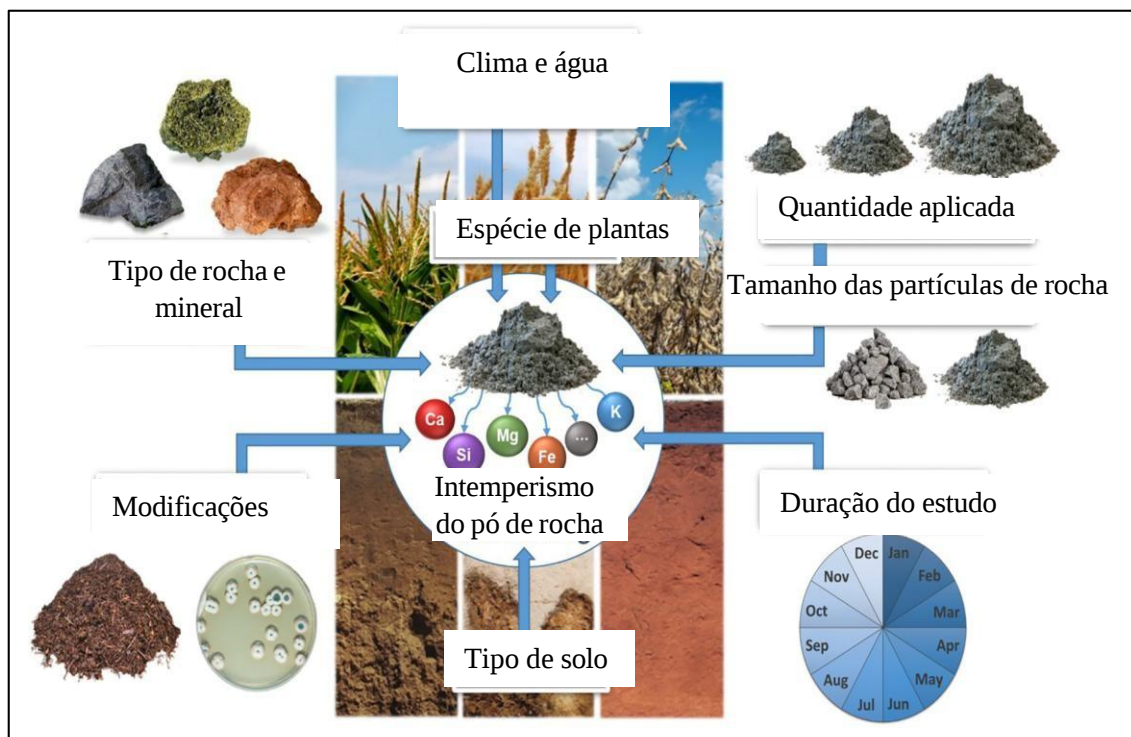


Figura 1. Principais influências para a resposta ao intemperismo pelo PR.

Fonte: Adaptado de Swoboda *et al.* (2022).

Observa-se que a velocidade do intemperismo tem relação direta com o tipo de solo, bem como, com as espécies de plantas presentes, e ainda com o material de origem que promoverá modificações peculiares a cada caso, além do tamanho das partículas e da duração do estudo realizado (Figura 1).

De acordo com Manning e Theodoro (2020) mensurar a velocidade do intemperismo e, portanto, a velocidade da disponibilização do PR na solução de solo é tarefa complexa, pois este material normalmente advém de mais de um mineral primário, de forma que para o cálculo deve-se levar em conta cada um desses minerais de forma singular, além do seu percentual dentro da rocha e sua textura em cada caso.

Neste sentido, Glazner *et al.*, (2019) destacam a importância da correta nomenclatura das rochas que serão fontes de estudo, seguindo os padrões da literatura internacional, no intuito de diminuir a reprodução de erros.

A cinética de dissolução do PR será diretamente influenciada pelo tamanho das partículas agregadas ao solo, pois este dado tem influência com a área de superfície reativa, que vai ser maior com a diminuição do tamanho de cada partícula. Deste modo,

estudos demonstram que a diminuição do tamanho das partículas tem efeito positivo no aumento da solubilidade de minerais de rocha, como feldspatos alcalinos (Holdren e Speyer, 1985), gnaise (Wang *et al.*, 2000), basalto (Gillman *et al.*, 2001) e rochas vulcânicas alcalinas (Basak *et al.*, 2018).

Para entender a cinética de dissolução das rochas deve-se ainda partir da premissa que o intemperismo não irá afetar as superfícies minerais de maneira uniforme, mas tende a ocorrer primeiramente em locais onde se detectam defeitos cristalinos, contendo imperfeições e buracos que promovem deslocamentos desuniformes na estrutura de cada mineral, e que têm efeito direto na velocidade da disponibilidade de cada um, principalmente nas fases iniciais do processo intemperístico (Holdren e Speyer, 1985).

Os dois fatores climáticos que terão influência direta na cinética do intemperismo dos minerais de rocha serão a temperatura ambiente e a precipitação. Maiores temperaturas aumentam a energia de ativação e promovem maior velocidade de dissociação mineral, em relação à presença de água, que se faz fundamental para o intemperismo químico dos solos, além disso, o fluxo de água na solução de solo levará a um desequilíbrio iônico com a superfície mineral, promovendo assim o processo de intemperismo (Kump *et al.*, 2000; Sanchez, 2019, Weil e Brady, 2017).

A Figura 02 demonstra a importância do intemperismo para a manutenção da mineralogia dos solos agrícolas.



Figura 2. Demonstração dos processos do intemperismo para a formação do metamorfismo e das rochas formadoras dos solos agrícolas.

Fonte: Veloso, 2023.

Ainda em relação a cinética dos processos de intemperismo, Hinsinger *et al.* (2001) explicam que a cinética das taxas de dissolução mineral tem sido subestimada, uma vez que os estudos ainda não contabilizam a influência de plantas superiores na cinética de intemperismo. Estas plantas influenciam a microbiota e as condições físicas do solo, particularmente na rizosfera, onde as condições podem diferir muito daquelas no solo descoberto.

A velocidade do intemperismo e absorção mineral é diretamente afetada pela temperatura do solo, pH, níveis de umidade, além das concentrações elementares e de gases, de tal modo que se altere a velocidade e o equilíbrio das reações entre a fase mineral sólida e a solução do solo (Harley e Gilkes, 2000; Marschner, 2002).

Estudos demonstram uma maior taxa de liberação de minerais benéficos na presença de cobertura de solo. Hinsinger *et al.*, (2001) demonstraram que na presença de várias plantas a liberação de Si, Ca, Mg e Na provenientes de rocha de basalto aumentou por um fator que variou de 1 a 5 em comparação com um controle sem plantas. Neste mesmo estudo, na presença de bananas e especialmente milho, as quantidades de ferro (Fe) liberadas aumentaram de 100 a 500 vezes quando comparadas ao solo descoberto. O que corrobora estudo de Römheld e Marschner (1990) que diz que espécies de gramíneas têm um mecanismo distintamente eficiente para aquisição de ferro, caracterizada por uma síntese melhorada e liberação de fortes quelantes de Fe, chamados fitosidróforos.

De acordo com Haque *et al.* (2019) as taxas de intemperismo são ainda melhores com o uso de soja como cobertura em relação ao milho, pois nota-se uma associação adicional com a liberação de H^+ durante a fixação de nitrogênio nos rizóbios presentes nas leguminosas.

De acordo com Wang *et al.* (2000) há ainda ganhos na taxa de intemperismo relacionados à presença das raízes das plantas na rizosfera, que promovem simbiose com fungos micorrízicos arbusculares. De acordo com esse autor as micorrizas promovem sistemas radiculares maiores e mais densos, que aumentariam a captação mineral. Tais autores observaram aumento na aquisição de K^+ provenientes de rochas de gnaiss na presença de tais fungos.

Estudos indicam que microrganismos benéficos podem agir no sentido de dissolver silicatos (SDM) ou materiais orgânicos como composto e estrume. Neste sentido, já foram identificadas tanto bactérias quanto fungos com tal capacidade. Neste entendimento, uma vez que o PR contém vários nutrientes minerais, exceto N, um composto ou esterco enriquecido com PR poderia teoricamente fornecer todos os macros e micronutrientes

necessários ao desenvolvimento vegetal (Basak *et al.*, 2017; Meena *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2020).

Neste sentido, o próprio processo de compostagem já poderia aumentar o desgaste das rochas por meio de ácidos orgânicos produzidos micro biologicamente, além de temperaturas elevadas e altas concentrações de CO₂ (Liu *et al.*, 2020).

Estudos indicam alterações de ordem físico-química com a possibilidade da fusão de silicato rico em K⁺ com minerais com materiais alcalinos (Ca(OH)₂ ou NaOH) sob condições de hidrotermia. A mineralogia inicial é significativamente alterada, resultando em taxas de intemperismo substancialmente mais altas e um mineral multifásico estrutura que pode adicionalmente melhorar as condições físico-químicas do solo (Liu *et al.*, 2017; Ciceri *et al.*, 2017; Mbissik *et al.*, 2021).

A cinética de dissolução pode ser acelerada por meio de tratamentos ácidos que visam corroer a estrutura mineral e, assim, aumentar a liberação de nutrientes. Estudo de Santos (2015) demonstrou que o uso de com ácido nítrico (HNO₃), ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) como solventes aceleraram o intemperismo de rochas provenientes de micas.

3.6.4 Respostas morfológicas e fisiológicas das plantas associadas ao uso do pó de rocha

A utilização do PR como fonte de elementos essenciais e benéficos pode trazer benefícios morfológicos e fisiológicos aos cultivos. A liberação desses minerais na solução de solo e a captação pelas plantas reverte em fornecimento de componentes estruturais aos tecidos, o que pode conferir mais rigidez à parede celular e ainda participam diretamente de rotas metabólicas, que permitem o desenvolvimento do processo fotossintético, a liberação de ativadores de enzimas fundamentais aos processos celulares, como ATP's (Adenosina Tri fosfato), promovem o crescimento radicular, e o crescimento e o desenvolvimento do vegetal como um todo, resultando assim, no aumento e eficiência dos processos fisiológicos (Ratke *et al.*, 2020).

A resposta do PR na fisiologia da planta, levando ao fornecimento de macronutrientes essenciais, como fósforo, potássio e magnésio influencia positivamente no seu potencial osmótico, além de promover processos fisiológicos e bioquímicos, como fotossíntese e respiração, que converterão no crescimento e desenvolvimento do vegetal (Dreyer *et al.*, 2017; Wang e Wu, 2017).

Alguns estudos ainda associam a presença do PR à liberação de cofatores enzimáticos ligados à proliferação de microrganismos benéficos que se associam à zona da rizosfera das plântulas, denominados fungos micorrízicos e que aumentam a área específica de absorção radicular, permitindo, portanto, um melhor aproveitamento da mineralogia circundante a rizosfera e até a captação de nutrientes de difícil mobilidade, como o fósforo (Edward *et al.*, 2016).

Alguns autores encontraram correlação positiva entre o uso do PR e o aumento da massa de mil grãos (MMS) quando comparados com cultivos que utilizaram este remineralizador de solo e adubos químicos tradicionais (Bertoldo *et al.*, 2015; Writzl *et al.*, 2019).

Experimento na região Norte de Minas proposto por Alves *et al.* (2021) utilizando o PR de origem ardózica em conjunto com calcário demonstrou que nas parcelas que se utilizaram os dois condicionadores de solo houve aumento de até 54% na produtividade do feijoeiro, e ganho de quase 12% na massa de 1000 grãos, quando comparada com a parcela sem tratamento, em condições de irrigação via micro aspersão. Tal experimento demonstra que esses materiais são capazes de oferecer importantes macronutrientes para o desenvolvimento dos cultivos e de influenciar positivamente no seu desenvolvimento fisiológico, com melhoria nos processos metabólicos, o que reverte em maior desenvolvimento final.

Uma questão a ser respondida é a quantidade ótima de aplicação do PR, independente do material de origem, visando melhora nos parâmetros morfológicos e fisiológicos dos cultivos, esta informação ainda se reveste de grande empirismo e experimentação. Enquanto agricultores australianos geralmente aplicam doses que variam de 0,5 a 4 toneladas por hectare (Bolland e Baker, 2000), em latossolos brasileiros esses valores variam entre 1 a 20 toneladas, em consonância ao que ainda é aplicado em relação à calagem nestes mesmos solos (Fageria e Baligar, 2008). Experimentação de Theodoro e Leonardos (2006) a correção ideal abrangeria uma reposição de até 6 toneladas por hectare.

Embora esses valores ainda estejam em análise sabe-se que doses muito altas devem ser evitadas a fim de se evitar desequilíbrios de nutrientes devido às relações antagônicas de nutrientes no solo (Swoboda *et al.*, 2022).

3.6.5 Alterações no teor de nutrientes das plantas relacionadas ao uso do PR

O uso do PR pode alterar quimicamente os cultivos. Estudos indicam que os minerais presentes no solo e captados via solução de solo são aproveitados quimicamente, sendo que, a presença desses minerais dependerá diretamente do material de origem utilizado como substrato deste PR (Brito *et al.*, 2019).

De acordo com estudo de Pádua e Florentino (2022) o uso de bactérias advindas de produtos microbiológicos pode reverter em aumento da solubilização de nutrientes no solo repostos via PR, com destaque para o aumento da solubilização do potássio. Este estudo corrobora para o resultado encontrado por Lopes-Assad *et al.*, (2006), em que os autores associaram as bactérias do gênero *Aspergillus* ao aumento de solubilização de rochas potássicas no solo.

De modo correlato Florentino *et al.* (2017) verificaram que algumas estirpes de bactérias diazotróficas, que exercem primordialmente a função de fixação de nitrogênio, também são capazes de produzir fitormônios, controlar patógenos e solubilizar minerais que contenham fósforo (P) e potássio (K), o que contribui para o crescimento e desenvolvimento do vegetal.

O aumento da solubilização de fósforo também tem sido correlacionado em diversos estudos com o uso do elemento benéfico silício, de modo que, verificou-se experimentalmente que a medida que o silício era disponibilizado na solução de solo aumentou-se a absorção de P pelas plantas, uma vez que houve menor adsorção desse nutriente, provavelmente pela adição de ânions que competiram com o fosfato nos seus sítios de adsorção do solo (Carvalho *et al.*, 2001; Leite, 1997; Carvalho, 2014).

Ratke *et al.* (2020) afirmam que o uso do PR como fonte de mineral para as plantas pode afetar positivamente a sua curva de resposta, que tende a se desenvolver com mais celeridade e com melhores índices produtivos. Esses autores propuseram em experimento tratamentos termodinâmicos para três diferentes materiais de origem e observaram a dissolução, incorporação e captação desses minerais de forma mais rápida pelo sistema solo-planta. Verificaram ainda que os materiais continham ampla mineralogia, incluindo potássio, magnésio, fósforo, ferro e silício. Além disso, verificaram que o PR como condicionante de solo teria propriedades capazes de elevar a acidez do solo, tanto quando utilizaram material de origem previamente acidificado como sem acidificação. Uma conclusão muito importante desse estudo foi a constatação do aumento da massa seca de raízes quando o cultivo (milho) foi submetido aos tratamentos com PR, independentemente de sua origem.

Kautzmann *et al.* (2013) utilizaram pó rocha advindo de rochas vulcânicas presentes em resíduos de usinas de britagem, e observaram que esse material foi capaz de elevar a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo tratado, e ainda, liberar quantidades significativas de cálcio e magnésio, na forma de carbonatos, o que reverteu no aumento do pH deste solo. Os autores demonstram ainda que o material apresentou alta concentração de fósforo, além de potássio, zinco, boro, cobre, ferro e manganês, todos passíveis de serem disponibilizados para as plantas.

Aquino *et al.* (2020) em estudo com três rochas características da região de Fortaleza (CE) concluíram que as mesmas são eficazes para correção de pH, tanto quanto, em tratamentos que se utilizou o calcário para o mesmo fim.

Estudo de Swoboda *et al.* (2022) analisou 48 estudos revisados e observou o incremento no suprimento mineral após a incorporação do PR, além de propriedades químicas como pH e CTC. Foi ainda verificado incremento positivo para microbiota do solo, além da ocorrência de metais pesados em diferentes metodologias e para diversos materiais de origem.

Swoboda *et al.* (2022) observaram incremento de diversos minerais essenciais nos solos, com destaque para o potássio, além de aumento de Mg, Ca, Zn, P, Fe, Na, Cu, Si e Mn. Houve ainda significativa alteração do pH, e em menor escala alterações na CTC, biologia e física do solo, além da ocorrência em 04 ensaios do aumento de metais pesados nesses solos.

Experimento de Rodrigues *et al.* (2021) avaliou a influência do PR tanto nos parâmetros químicos do solo quanto no aporte nutricional da cana-de-açúcar. Os autores analisaram o solo antes e depois da implementação do experimento e promoveram análise foliar sete meses após o plantio do cultivo. De acordo com tais análises pôde-se observar que além do aumento do pH do solo, houve ainda acúmulo de K, Mg e S pelas plantas. Deste modo, evidenciou-se que a rochagem promovida foi uma alternativa viável como fonte de nutrientes, aumentando os teores de íons disponíveis no solo e o acúmulo de nutrientes pelas plantas.

3.7 Produtos microbiológicos para potencializar o uso do PR

A agricultura moderna exige tecnologias auxiliares para obter altos níveis de produção, além de ao mesmo tempo ser limpa e sustentável. Neste sentido, existem alguns produtos no mercado para auxiliar na elevação do potencial produtivo dos cultivos que

apresentam custo de aquisição relativamente acessível e não são poluentes ou prejudiciais ao meio ambiente e aos seres vivos.

Entende-se por produtos microbiológicos aqueles que disponibilizam em sua formulação seres vivos promotores de desenvolvimento vegetal. Tais produtos estão presentes na solução do solo e podem aumentar a velocidade de processos físico-químicos neste ambiente, tais como: mobilização e imobilização de minerais, bem como a ciclagem de nutrientes (Sierra, 2008).

De acordo com Azcón (2000) alguns microorganismos tem beneficiado o desenvolvimento da agricultura tropical, com destaque para os fungos micorrízicos, além das bactérias fixadoras de nitrogênio e das rizobactérias promotoras de crescimento vegetal. O uso de tais organismos, além de contribuir para o desenvolvimento das plantas está associado à sua maior proteção em relação aos patógenos de solo. Sabe-se que a captação dos nutrientes e da solução do solo pode ser facilitada por meio da ação de organismos benéficos às plantas, que fazem trabalho em conjunto com esses vegetais, em uma situação de simbiose.

A *Rhizobium tropici* é uma bactéria fixadora de nitrogênio que entra em simbiose com a raiz do feijoeiro e de acordo com Cerro *et al.* (2017) é a espécie mais adaptada aos solos ácidos tropicais brasileiros, desenvolvendo alto percentual de nodulação e alta tolerância aos estresses ambientais, como altas temperaturas e índices elevados de acidez e salinidade no solo.

As bactérias fixadoras de Nitrogênio (N) do gênero *Rhizobium* são organismos procariontes capazes de fixar o nitrogênio atmosférico, transformar na forma assimilável NH_3 e promover sua disponibilidade aos cultivos (Silva *et al.*, 2019). Geralmente são introduzidos ao sistema por meio de inoculação e respondem pelo fornecimento de parte desse nutriente às culturas por meio de nódulos desenvolvidos nas raízes, principalmente às leguminosas (Souza *et al.*, 2021), embora alguns estudos já associem o seu uso às gramíneas (Silva *et al.*, 2010).

Alguns outros gêneros de bactérias procariontes estão associados a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), disponibilizando parte deste gás atmosférico para os cultivos. Tal processo é realizado mediante o processo enzimático denominado nitrogenase, e estudos indicam que cerca de 65% do nitrogênio fixado no planeta advém desse processo, o que o transforma no segundo processo biológico mais necessário, ficando atrás apenas da fotossíntese (Einsle *et al.*, 2020).

Um outro agente microbiológico com grande eficiência agrônômica é o fungo do gênero *Trichoderma* spp., que são agentes de vida livre, assexuados, que reproduzem naturalmente nos solos temperados e tropicais. São utilizados para o controle de organismos fitopatogênicos encontrados no ambiente radicular, por meio de parasitismo, antibiose e competição. Estão ainda associados ao crescimento vegetal e ainda indução de resistência nas plantas cultivadas (Machado *et al.*, 2012). Os estudos iniciais com esse gênero datam do ano de 1936, quando estudos pioneiros associaram esse fungo ao controle de *Rhizoctonia solani*, e desde então trabalhos indicam efeitos benéficos em diversos cultivos, com destaque para rosáceas, olerícolas e grandes culturas, como: milho, algodão, feijão, arroz, grão-de-bico e eucalipto (Resende *et al.*, 2004; Almança, 2005; Fortes *et al.*, 2007).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em Paracatu – MG, na Fazenda Barra do Lagoão (Figura 4), localizada nas coordenadas geográficas 16°57'50.5"S e 46°38'07"W, e inserido na Mesorregião do Noroeste de Minas Gerais, bioma Cerrado (IBGE, 2008).

O município de Paracatu apresenta clima Tropical, sendo que no inverno existe menos pluviosidade que no verão. O clima da região, segundo Köppen-Geiger, é do tipo Aw, com temperatura média anual de 24 °C (Álvares *et al.*, 2014).

A pluviosidade média anual é de 1492,9 mm, sendo que nos meses da safra de verão (outubro a fevereiro) a média corresponde a 1128 mm de precipitação pluvial anual (INMET, 2021).

A altitude média da Fazenda Barra do Lagoão é de 540 m e os terrenos são em sua maioria planos e suave-ondulados, com declividade variando de 0 a 8%, sendo que para o experimento foi designada área com declividade de 0 a 3% e acesso facilitado à água e energia elétrica. A fazenda apresenta solos predominantemente latossólicos, sendo que a área experimental se caracteriza como Latossolo Vermelho-Amarelo, com textura argilosa e, em relação à mineralogia possui elevados teores de potássio e deficiência acentuada nos demais nutrientes (tabela 01).

Por estar em região de baixa altitude está associada a picos de temperaturas elevadas, sendo que em média a fazenda apresenta 2°C a mais de temperaturas médias anuais quando comparado ao município de Paracatu como um todo.

Durante o segundo ano do experimento, devido ao advento do “Super El Nino” a fazenda registrou temperaturas que ultrapassaram a marca dos 43°C.

4.2 Dados climatológicos

A temperatura diária (média, máxima e mínima), velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar foram obtidos em uma estação meteorológica localizada a 100 m do local do experimento (Figura 4). Para a precipitação pluviométrica foi instalado pluviômetro nas proximidades da área experimental.

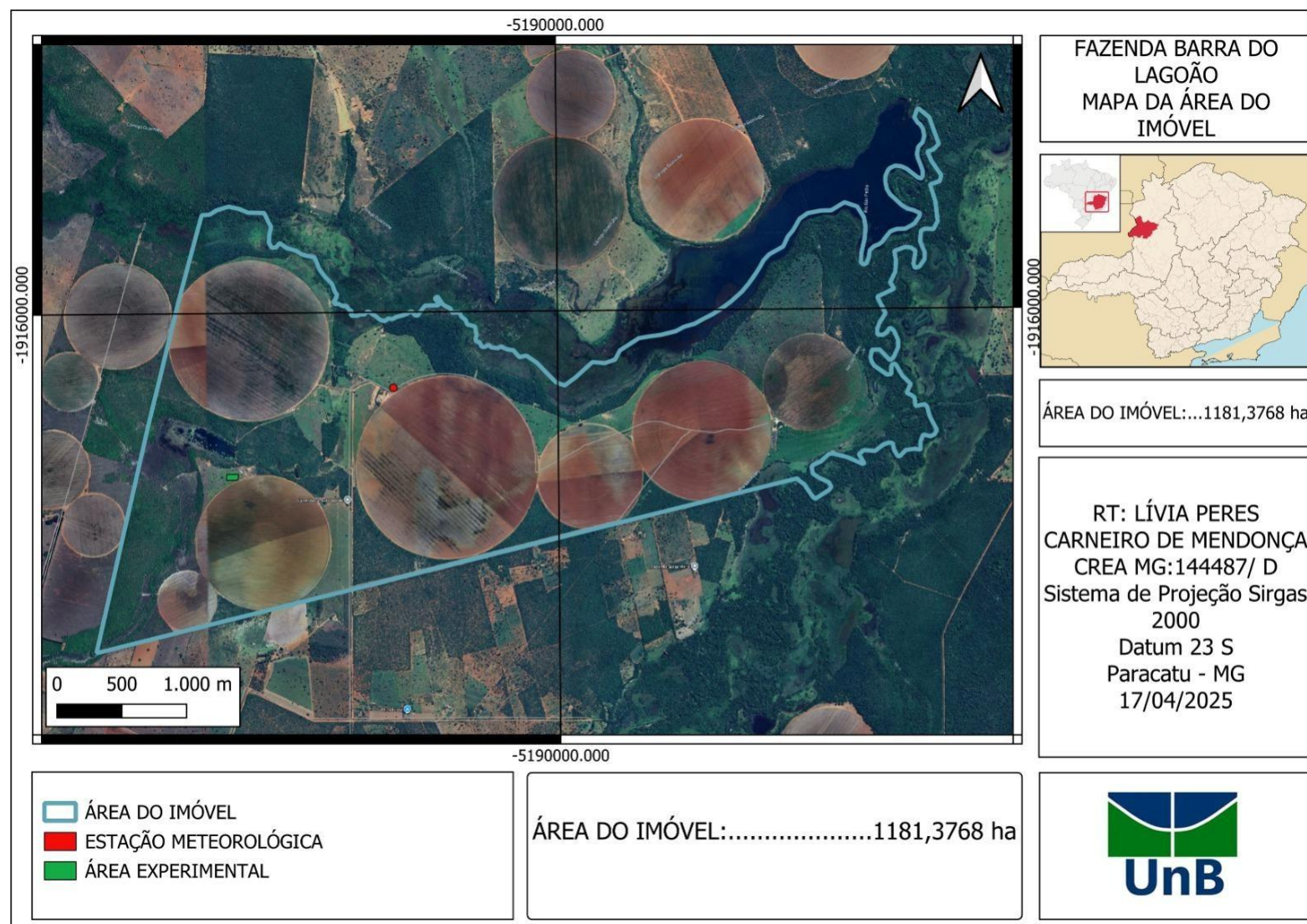


Figura 3. Localização da Fazenda Barra do Lagoão, Paracatu-MG.

4.3 Caracterização físico-hídrica do solo

Para caracterização das propriedades físico-hídricas do solo foi realizado ensaio para determinação do diâmetro do bulbo molhado, utilizando o mesmo gotejador utilizado na pesquisa, com um tempo de aplicação de 30 minutos, útil para estimar o percentual de área molhada e cada subparcela e com isso corrigir a lâmina de irrigação em função da aplicação localizada de água, sendo que a área da parcela experimental foi correspondente a 100% para o espaçamento entre gotejadores e linhas laterais utilizados (Figura 5):



Figura 4. Área experimental para o cultivo do feijão e soja com visualização da área umedecida e distribuição do sistema de irrigação por gotejamento superficial.

4.4 Correção com calagem e gesso agrícola, adubação inicial do solo e tratos culturais

A área utilizada na condução do experimento não recebeu adubos e corretivos nos 05 anos anteriores ao início da pesquisa, porém estava cultivada por pastagens

espontâneas, predominantemente por *Brachiaria spp.* Já houve correções em tempos anteriores para utilização desta área com finalidade de pastagem para bovinos.

Inicialmente o solo da área foi preparado com aração e gradagem até a profundidade de 0,20 m, sendo esta camada utilizada para determinar as dosagens de macronutrientes e calcário. A análise inicial de fertilidade do solo foi realizada em três amostras, compostas oriundas de 10 subamostras coletadas em zig zag na área experimental, para análise química e textural do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Valores dos atributos químicos e textura do solo na camada 0 a 0,20 m antes da instalação do experimento com cultivo do feijoeiro e soja.

pH	MO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	AcP	CTCe	CTCt	B	Cu	Fe	Mn	Z
H ₂ O	dag kg ⁻¹	cmol _c dm ⁻³						mg dm ⁻³				
5,49	2,2	3,17	2,11	< 0,1	2,48	5,78	8,16	0,43	0,80	26,75	18,46	1,94
p	K ⁺	S	m		V		Areia		Silte		Argila	
mg dm ⁻³								%				
3,71	154,8	4,13	0,0		70		32		33		35	

pH: pH em água; MO: Matéria Orgânica; K: Potássio Extraível; Ca: Cálcio Extraível; Mg: Magnésio Extraível; Al: Alumínio Trocável; AcP: Acidez potencial (H+Al); CTCe: CTC efetiva; CTCt: CTC total pH 7,0; m: Saturação por Al trocável; V: Saturação por bases e P: Fósforo Extraível (Mehlich). CTC: Capacidade de Troca de Cátions, B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: manganês e Z: Zinco.

Em resposta às análises de solo, a área com o tratamento utilizando adubo e PR não foram corrigidas quanto à acidez e a reposição de Ca e Mg, pois se verificou que os valores de V% estavam acima de 70%, sendo, portanto, adequado para as culturas do feijoeiro e da soja.

O PR foi distribuído na superfície do solo a lanço manual e incorporado no solo com revolvimento da camada de solo de 0,05 m aos 15 dias anteriores a semeadura para feijão e soja. Uma vez que não ocorreram chuvas no período subsequente foi realizada a irrigação por gotejamento para melhor reação do produto após a sua aplicação.

No tratamento NPK, foi utilizado MAP, contendo 11, 52 e 0% de N, P e K, respectivamente, e cloreto de potássio (KCl), que possui 60% de óxido de potássio (K₂O), para o feijoeiro e para a soja. O MAP e o KCl foram distribuídos a lanço manual na superfície do solo e incorporados com revolvimento da camada de 0,05 m aos 15 dias antes da semeadura. As doses de MAP e KCl obedeceram ao recomendado pela 5ª Aproximação para Minas Gerais, em NT3, correspondendo a 90 quilos de P₂O₅ ha⁻¹ provenientes do MAP e 20 quilos de K₂O ha⁻¹ provenientes do KCl para feijoeiro e 120 pontos de P₂O₅ ha⁻¹ provenientes do MAP e 40 quilos de K₂O ha⁻¹ provenientes do KCl

para a soja, decorrentes da disponibilidade inicial de P ser baixa e de K ser adequada (Ribeiro *et al.*, 1999).

A adubação nitrogenada para o feijoeiro foi aplicada em cobertura, em toda a área, na forma de ureia, em 2 aplicações, aos 18 DAS (abertura do primeiro trifólio) e aos 31 DAS, na dose de 40 kg ha⁻¹ por aplicação como descrito por Ribeiro *et al.* (1999). Os micronutrientes foram aplicados em dose única, via foliar, aos 30 DAS, para que houvesse uma floração mais responsiva, sendo que o boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), e zinco (Zn) foram repostos por meio do produto Starter Mn e cobalto (Co) e molibdênio (Mo) por meio do produto Co-Mo, ambos na dose de 2 L ha⁻¹ (Barros e Novais, 1999).

Em relação à soja, devido a sua alta eficiência nos processos de fixação biológica de nitrogênio, dispensou-se a adubação de cobertura com ureia em área total, tal como preconizado pela 5ª Aproximação para o estado de Minas Gerais (Ribeiro *et al.*, 1999), mantendo-se a reposição dos micronutrientes via adubação foliar tal como foi feita para o feijoeiro, na mesma dosagem.

Foi feita capina manual para o controle de plantas invasoras, bem como aplicação de inseticida a base de Flumizina para o controle de formigas aos 10 DAS (50 g ha⁻¹) nos dois cultivos, 4 aplicações de inseticida a base de acetato (1 kg ha⁻¹) e Abamectina (200 mL ha⁻¹) para o controle de insetos “vaquinhas” e larva minadora. Ainda foi aplicado Ciantraniliprole (500 mL ha⁻¹) em 3 aplicações para o controle de mosca branca e Mancozeb com Picoxistrobina (1 L ha⁻¹) para controle de doenças fúngicas no feijão.

Para a soja não foram feitas aplicações de inseticidas, pois os ataques de inseto se mantiveram abaixo do NDE (Nível de Dano Econômico). Foi feita aplicação preventiva de fungicidas, principalmente para o controle de ferrugem asiática, sendo usados Cloratonil Nortox em duas aplicações (35 DAS e 45 DAS) na dose de 500 mL ha⁻¹ e Mancozeb Nortox (2 L ha⁻¹), conjuntamente, em duas aplicações (35 DAS e 45 DAS).

4.5 Análise química do solo no final do ciclo de cultivos do feijoeiro e da soja

Ao término dos ciclos de cultivo do feijoeiro e da soja foram realizadas coletas de solo na camada de 0 a 0,20 m em todas as subparcelas, totalizando 72 amostras em cada ciclo de cultivo, para determinação dos seguintes parâmetros: cobre extraível, ferro extraível, manganês extraível, zinco extraível, enxofre, pH em água, potássio extraível, cálcio extraível, magnésio extraível, alumínio trocável, acidez potencial, CTC efetiva, CTC total, saturação por alumínio trocável, saturação por bases, sódio e fósforo extraível.

As análises foram realizadas em laboratório terceirizado, e as técnicas de determinação analítica seguiram os métodos propostos por Silva *et al.*, (1999).

4.6 Inoculação e tratamento de sementes

4.6.1 Sementes de feijão

Foi realizado o tratamento das sementes do feijoeiro, por meio da inoculação com *Rhizobium tropici*, na dose de 50 mL ha⁻¹, além da aplicação de *Trichoderma spp.* para o controle de fungos de solo, na dose de 280g por 100 kg de sementes, aplicação de fungicida químico Vitavax (Carboxina) na dose de 250 mL por 100 kg de sementes, destinado ao controle inicial da fusariose e do inseticida ADAGE 350 FS (Tiametoxam) para proteção inicial contra lagartas e mosca branca, na dose de 200 mL por 100 kg de sementes.

4.6.2 Sementes de soja

As sementes da soja receberam um tratamento industrial, que é associado ao material que foi escolhido para a condução no experimento. A soja B5830 CE (Brevant) possui um sistema de Tratamento de Sementes Industrial denominado LumiGEN®, com metodologia exclusiva onde são utilizados produtos que agem em conjunto na proteção da semente, sendo estes: Dermacor (inseticida), Lumialza (nematicida), fipronil (inseticida), Ranzona T (fungicida), Rizoliq (inoculante com 60 dias pré inoculação), Premax (protetor bacteriano que melhora o desempenho da inoculação) e Rizomicro (cobalto e molibdênio), necessários para a plena promoção dos processos de inoculação. Não foi feito nenhum tratamento adicional.

4.7 Cultivares utilizadas

4.7.1 Cultivar de feijoeiro

Foi a cultivar TAA Dama, sendo que as sementes foram adquiridas por distribuidora certificada. Essa variedade foi desenvolvida pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e possui excelente valor de mercado por apresentar escurecimento lento, além do bom desenvolvimento radicular em condições físicas adequadas do solo, ou seja, baixa compactação, alta porosidade e textura média, e ainda, boa resposta à adubação, desde que com umidade do solo próximo a capacidade de campo (Seprotec, 2023).

4.7.2 Cultivar de soja

A cultivar utilizada foi a B5830CE da empresa Brevant, que apresenta bom engalhamento e excelente potencial produtivo, possuindo ampla adaptação, boa estrutura de planta e tolerância moderada ao nematoide de cisto. Tem grupo de maturidade 8.3, tipo de crescimento indeterminado, altura de plantas de 84 cm em média e tolerância o acamamento (Brevant, 2024).

4.8 Descrição do pó de rocha

O PR utilizado foi de origem micaxisto (Figura 6), produzido pela empresa Remax Remineralizadores (mineradora Mistel), que possui Registro de Estabelecimento Produtor N° GO09345-9, e comercializa o micaxisto carbonático extraído em Luziânia, GO, registrado no MAPA sob nº 09345 10001-1.

O PR possui mais de 95% de sua composição passando por peneira de abertura malha 10, que corresponde ao tamanho de 2 mm.

O material atende a IN 5 e 6 de 2016 do MAPA, nos percentuais mínimos da soma de bases (potássio, óxidos de cálcio e de magnésio), percentuais máximos de elementos potencialmente tóxicos como cloro, sódio, metais pesados e de sílica livre, além da indicação do pH de abrasão e da granulometria, que deve ter fração menor que 0,3 mm, o que torna o material mais reativo, com maior superfície de contato com o solo para uma maior disponibilização dos nutrientes para as plantas (REMAX, 2022).



Figura 5. Visualização do PR utilizado no experimento.

4.9 Semeadura e delineamento experimental do feijoeiro e da soja

A área experimental foi a mesma para o feijoeiro e para soja. A dimensão de cada subparcela foi de 2 x 2 m (4 m²) com 0,5 m de distância entre as subparcelas, necessitando de uma área de 19,5 x 29,5 m (Figura 5).

Antes da semeadura da soja foi feita a dessecação dos restos culturais do feijoeiro, bem como das plantas invasoras existentes na área com Glifosato (2 L ha⁻¹).

A semeadura do feijoeiro e da soja foi feita em sistema de plantio convencional e ocorreu na safra de inverno, mais precisamente em 29 de junho de 2022 para o feijoeiro e em 06 de outubro de 2023 para a soja, após o solo ser preparado em ambos os casos com grade aradora até a profundidade de 0,20 m. Distribuiu-se 11 sementes de feijoeiro por m linear, totalizando 88 sementes nas quatro linhas de plantio de cada parcela e 20 sementes de soja por metro linear, totalizando 160 sementes por parcela, incluindo as plantas de bordadura, com 0,50 m de espaçamento entre linhas de cultivo.

Tanto para o feijoeiro como para a soja, o experimento foi conduzido em blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas quatro lâminas de irrigação (Figura 7), correspondentes a 120% (L1), 100% (L2), 80% (L3) e 60% (L4) da ETc. Nas subparcelas havia 1 tratamento testemunha (sem adição de adubação) (T0), 1

com adubação tradicional com NPK (TNPK) e 4 doses de PR, sendo de 1 (P1), 3 (P3), 5 (P5) e 7 (P7) t h⁻¹, com três repetições.

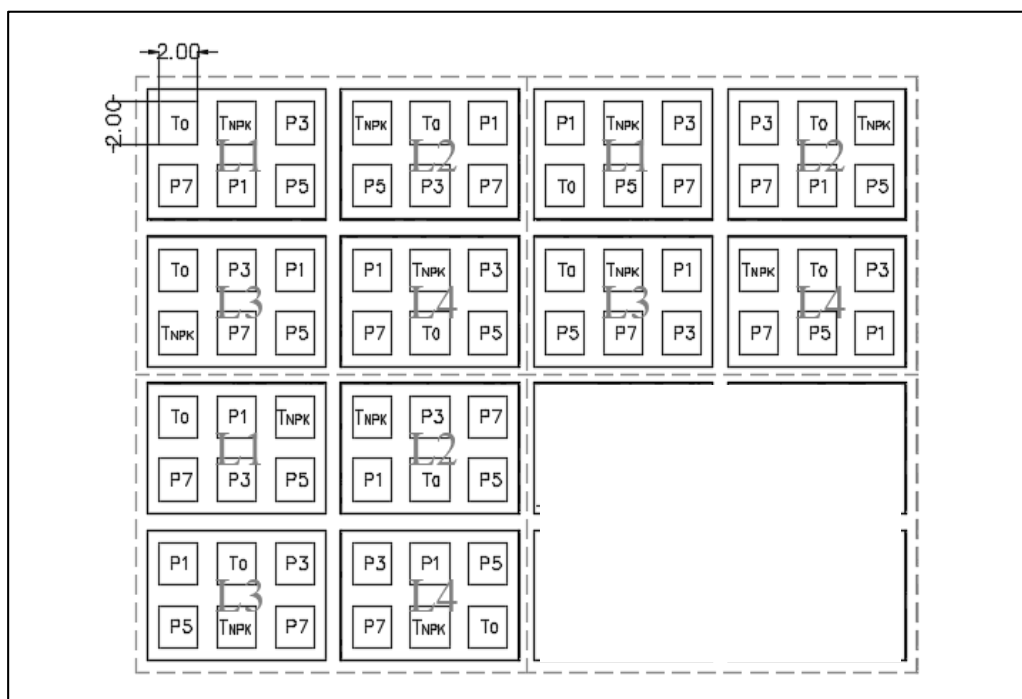


Figura 6. Distribuição dos tratamentos de cultivo do feijoeiro e da soja.

4.10 Irrigação

4.10.1 Sistema de irrigação

A irrigação foi realizada por gotejamento superficial, utilizando fitas gotejadoras de 16 mm de diâmetro externo, gotejadores *in line* de fluxo turbulento, e espaçados de 0,20 m entre emissores, com vazão de cada emissor de 1,78 L h⁻¹ na pressão de 15 kPa, e instalados a 0,05 m da linha de plantio.

Foi instalado um cabeçal de controle composto de um filtro de disco de 125 microns, tomada de pressão para manômetro de Bourdon com glicerina, quatro registros de gaveta, quatro válvulas solenoide para controle da irrigação (um para cada lâmina de irrigação), acionadas por um painel de irrigação, marca Hunter e uma motobomba de 2 CV. A irrigação foi realizada diariamente até a completa emergência dos cultivos e a partir da diferenciação a Li aplicada usou-se turno de rega de dois dias, sendo iniciada às 17:00h, tanto para o feijoeiro como para a soja.

4.10.2 Uniformidade de distribuição de água

A aferição da vazão dos gotejadores foi determinada no início do ciclo do feijoeiro e da soja (gotejadores novos), em 3 linhas laterais, sendo uma próxima a entrada, outra na parte central e outra no final da área experimental, medindo-se a vazão de 16 gotejadores em cada linha lateral, totalizando 48 emissores avaliados. O tempo de coleta de vazão foi de 90 s, utilizando o método volumétrico direto com o auxílio de uma proveta graduada, com precisão de 1,0 mL e de um cronômetro digital. Para obtenção dos dados de vazão foi fixada a linha lateral a 0,15 m da superfície do solo, suspensa por cavaletes, fixadas nas extremidades, mas permitindo sua movimentação horizontal, fazendo coincidir as gotas de água no interior dos coletores com pequenos movimentos horizontais da linha lateral.

Após as medições, o valor médio do volume foi de 44,44 mL por 90 s, o que corresponde a vazão de 1,78 L h⁻¹.

O Coeficiente de Uniformidade de Emissão (CUE) foi obtido pela seguinte Equação 1.

$$CUE = 100\% [1 - CV] \quad (1)$$

em que,

$$CV = \text{Desvpad} / \bar{X}$$

Desvpad = desvio padrão da média;

n = número de coletores;

X_i = precipitação individual em cada coletor, em mm;

$\bar{X}$ = precipitação média em cada quadricula, em mm.

CV = Coeficiente estatístico de variação da vazão, ou seja, coeficiente de variação.

O desvio padrão foi de 1,0 mL, CV de 0,023% e CUE foi estimado de 98%. O CUE foi utilizado para correção da Li aplicada.

4.10.3 Manejo da irrigação

A demanda hídrica das culturas de feijoeiro e soja foram estimadas considerando a ET_c. Este dado foi fornecido diariamente por meio de *software* utilizado na fazenda Barra do Lagoão, local do experimento. Este *software* é disponibilizado pela empresa Icrop, que faz o monitoramento da necessidade de irrigação da propriedade.

Para se obter a ET_c foi necessário considerar a evapotranspiração de referência (ET_o), obtida pela Equação 1 de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ET_o = 0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900 T_{med} + 273 u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

em que:

ET_o = é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

R_n = radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

G = densidade do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

T_{med} = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

V_2 = velocidade do vento média diária a 2 m de altura (m s^{-1});

e_s = pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

e_a = pressão atual de vapor d'água (kPa);

Δ = declividade da curva de pressão de vapor d'água ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ = coeficiente psicrométrico (MJ kg^{-1});

λ = Calor latente de vaporização ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os dados climáticos foram obtidos por meio da estação meteorológica marca da Icrop, localizada na propriedade Barra do Lagoão, a cerca de 100 m da área experimental.

Deste modo, pode-se obter os valores de ET_c com uso da seguinte Equação 2.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (2)$$

Os valores de K_c do feijoeiro foram os propostos por Doorenbos e Kassam (1979), sendo correspondentes a 0,75 da germinação ao desenvolvimento inicial (7 DAS), 0,76 a 0,99 na fase vegetativa (8 a 33 DAS), 1,0 a 1,05 na floração (34 a 65 DAS), 1,05 no enchimento de grãos (66 a 85 DAS) e 0,95 na maturação (86 a 90 DAS) (Figura 8). Os valores de K_c variaram dia após dia, em correspondência ao respectivo dia de cultivo, sendo modulado pelo software da Icrop ajustada para a irrigação por gotejamento.

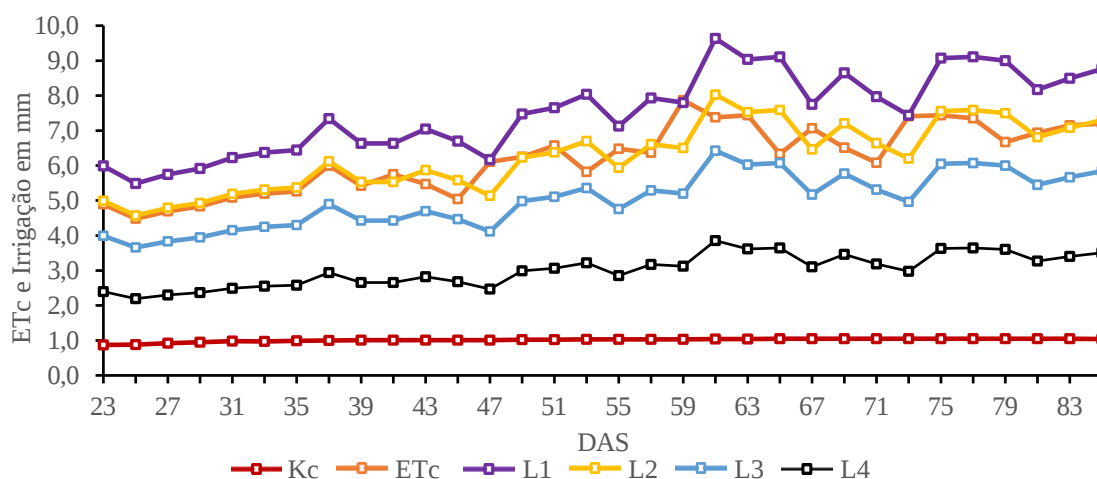


Figura 7. Coeficiente de Cultura (K_c), evapotranspiração da cultura (ET_c) e L_i aplicadas a cada dois dias após semeadura do feijoeiro.

Para a determinação do Kc da soja, foram utilizados os valores disponíveis em Bastos et al. (2007), sendo correspondentes a 0,38 na fase inicial (0-14 DAS), 0,93 a 1,03 na fase de crescimento vegetativo (15-39 DAS), atingindo o valor de 1,04 e chegando a 1,28 na floração (40-64 DAS), 1,29 no enchimento de grãos (65-104 DAS), decaindo a 0,80 na maturação (105-120 DAS), sendo apresentados, juntamente com a ETc, as Li e a precipitação na Figura 9.

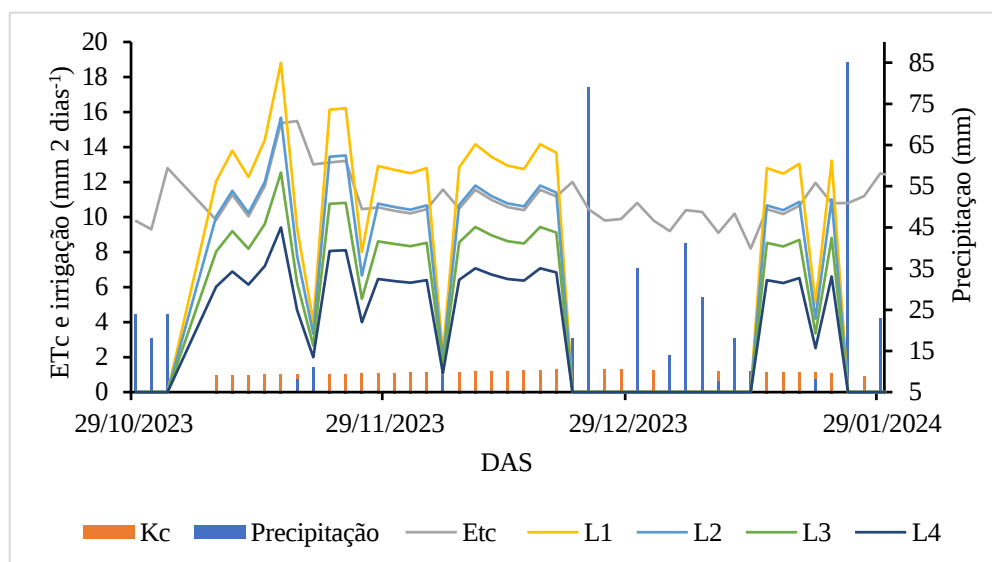


Figura 8. Precipitação, coeficiente de cultura (Kc), evapotranspiração da cultura (ETc) e Li aplicadas a cada dois DAS da cultura da soja.

A irrigação real necessária (IRN) foi calculada levando em consideração a existência de precipitação efetiva no período, que em dias de ocorrência foi computada para a determinação da Li aplicada em cada tratamento. A IRN foi determinada pela diferença entre os valores de ETc e da precipitação efetiva acumulada e corrigida pela divisão do valor obtido pelo CUE, conforme Equação 3.

$$ITN = (ETc - Pe) / CUE \quad (3)$$

Os coeficientes de umidade do solo (Ks), segundo Bernardo et al. (2008) e de localização (Kl), segundo Keller e Bliesner (1990) foram calculados de acordo com as Equações 4 e 5, respectivamente.

$$Ks = \frac{\ln(LAA+1)}{\ln(CTA+1)} \quad (4)$$

$$Kl = 0,1\sqrt{P} \quad (5)$$

em que:

LAA: Lâmina Atual de Água no solo (mm);

CTA: Capacidade Total de Água no solo (mm);

P: maior valor entre porcentagem de área molhada ou sombreada (%).

OBS: Sendo a área molhada no experimento de 100%, foi considerado $Kl = 1$.

A lâmina líquida foi determinada com base no método climático, onde determina-se a lâmina de água que representa o consumo real pela cultura, ou seja, a lâmina que deverá ser adicionada ao solo para suprir a demanda das plantas num determinado espaço de tempo. Para este cálculo faz-se o produto da ETpc pelo turno de rega, conforme Equação 6.

$$LL = ET_{pc} \cdot TR \quad (6)$$

onde:

LL = lâmina líquida de irrigação (mm);

ETpc = evapotranspiração potencial da cultura (mm/dia);

TR = turno de rega (dia)

Após o cálculo da lâmina líquida determinou-se a lâmina bruta que é a lâmina total que deverá ser aplicada prevendo-se perdas. A lâmina bruta é demonstrada na Equação 7, e será utilizada como parâmetro para o cálculo de Ks.

$$LB = LL/CUE \quad (7)$$

em que,

LB = lâmina bruta de irrigação (mm);

Ea = eficiência de aplicação de água pelo sistema de irrigação (decimal).

4.11 Análises morfológicas e fisiológicas do feijoeiro e da soja

4.11.1 Feijoeiro

5.11.1.1 Análises morfológicas

Altura das plantas (AP): Foi obtida a altura da planta do feijoeiro e da soja, em cm, utilizando uma trena milimetrada, com precisão de 1 mm, medindo desde a haste na inserção no solo até o final da ramificação ou folha superior. Foram avaliadas 4 plantas úteis por subparcela, totalizando 12 plantas por tratamento, o que equivale a 192 plantas em todo o experimento aos 30 e 75 DAS para o feijoeiro e 45 e 90 DAS para a soja.

Diâmetro do coleto (DC): Foi medido o diâmetro do segundo internódio do feijoeiro e da soja, utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,001 mm em 4 plantas úteis por subparcela nas mesmas datas que Ap.

Massa úmida da parte aérea (MuAe) e massa úmida das raízes (MuRa): Foram selecionadas folhas, colmo (parte aérea) e raízes de 4 plantas por subparcela e a massa quantificada por meio de balança eletrônica com precisão de 0,01 g no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.

Massa seca da parte aérea (MsAe) e massa seca das raízes (MsRa): As partes vegetais das plantas de feijoeiro e soja foram acondicionados em sacos de papel e colocadas em uma estufa de secagem com circulação de ar forçada por um período de 72 h a 65 °C para obter a massa seca de cada parte vegetal, sendo utilizadas as folhas, hastes, raízes e vagens. Foram selecionadas 4 plantas aleatórias por parcela no final do ciclo

4.11.2 Soja

4.11.1.2 Análises morfológicas

Altura das plantas (AP): Foi obtida a altura da planta do feijoeiro e da soja, em cm, utilizando uma trena milimetrada, com precisão de 1 mm, medindo desde a haste na inserção no solo até o final da ramificação ou folha superior. Foram avaliadas 4 plantas úteis por subparcela, totalizando 12 plantas por tratamento, o que equivale a 192 plantas em todo o experimento aos 30 e 75 DAS para o feijoeiro e 45 e 90 DAS para a soja.

Diâmetro do coleto (DC): Foi medido o diâmetro do segundo internódio do feijoeiro e da soja, utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,001 mm em 4 plantas úteis por subparcela nas mesmas datas que Ap.

Produtividade (Prod) da soja: Ao final do ciclo da cultura, em cada tratamento foi estimada a produtividade média, em t ha⁻¹ para a soja, utilizando 10 plantas da parte central de cada subparcela.

Massa média dos grãos da soja (PMG): O peso médio de 1000 sementes foi obtido em balança com precisão de 0,001 g, utilizando 10 plantas da parte central de cada subparcela.

Número de Inserções por planta (NI): em cada planta de soja foram verificados o número de inserções em cada galho e depois o número de inserções por planta, afim de se verificar a capacidade de abertura na arquitetura da planta, utilizando 10 plantas da parte central de cada subparcela.

Número de vagem por planta (Nv) da soja: Foram quantificados o número de vagem por planta em dez plantas úteis por subparcela experimental, sendo as plantas as mesmas utilizadas para levantamento de Prod, PMG e NI.

4.11.3 Análises fisiológicas do feijoeiro e da soja

Taxa de assimilação de CO₂ (A) (fotossíntese), concentração intercelular de CO₂ (Ci), condutância estomática (gs) e transpiração (E), com estimativa das eficiências do uso da água (EUA) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), de carboxilação da Rubisco – A/Ci ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \mu\text{mol}^{-1} \text{ mol}$) e intrínseca do uso da água (iEUA) ($\text{mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), utilizando as relações A/E, A/Ci e A/gs, respectivamente: Utilizando-se medidor de fotossíntese portátil LCIPro-SD 5 (IRGA – Infra Red Gas Analyzer) (Modelo ADC BioScientific Ltda.) (Figura 10) em que as medições foram realizadas entre às 8:00 e às 11:00h com radiação fotossinteticamente ativa de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Foram estimados em 60 DAS para feijoeiro e para soja, em 4 plantas por subparcela.



Figura 9. Imagem do experimento com soja (A) e medição de parâmetros fisiológicos da soja com o uso do IRGA (B).

4.12 Análise estatística

A análise estatística foi feita mediante o aplicativo Sisvar (Ferreira, 2019), utilizando como parâmetro o teste de Tukey a 5% de significância. Foram rodados dados de PR, Li e a interação entre PR e Li (PRxLi).

4.13 Análise multivariada

A análise multivariada foi elaborada por meio do aplicativo Past, onde os parâmetros das análises de solo do feijoeiro e da soja foram analisados por meio da análise multivariada, formando um gráfico de PCA (**Principal Component Analysis – Análise de Componentes Principais**) como uma técnica estatística usada para reduzir a

dimensionalidade de um conjunto de dados, identificando as variáveis mais importantes que explicam a variação total dos dados, em uma análise de correlação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados do feijoeiro

5.1.1 Atributos morfológicos

Não houve diferença significativa na AP e DC entre as Li (Figuras 10A e 10B), o que demonstra a pouca influência da lâmina de irrigação nestes parâmetros, ou ainda, a uniformidade do material escolhido para trabalhar, por outro lado, Guimarães *et al.* (2020), ao avaliarem as Li de 40%, 60%, 80% e 100% da ETc associado a adubação com NPK (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 20 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio; e 30 kg ha⁻¹ de N, 15 DAS) para o feijoeiro caupi, verificaram que os maiores valores de AP e DC ocorreram a partir de aproximadamente 80% da ETc. Tanto a AP como o DC em função das medias das adubações para cada Li apresentaram para um modelo de ajuste do tipo polinomial de segundo grau, elevados valores de coeficiente de determinação (R²), sendo de 0,9837 e 1,0 para a AP e DC respectivamente (Figuras 11A e 11B).

Porém houve diferença significativa entre as adubações, onde a AP foi maior com o uso de NPK em relação ao T0 nas L1 e L2 (Figura 11C), bem como, no DC em L4, já na L1, o DC foi maior com o uso de 7 t ha⁻¹ e NPK (Figura 11D). Quanto à AP, Gonçalves *et al.* (2017) também não encontraram diferença significativa para Li de 50, 75, 100, 125 e 150% da ETo em experimento com feijoeiro caupi em região do semiárido brasileiro.

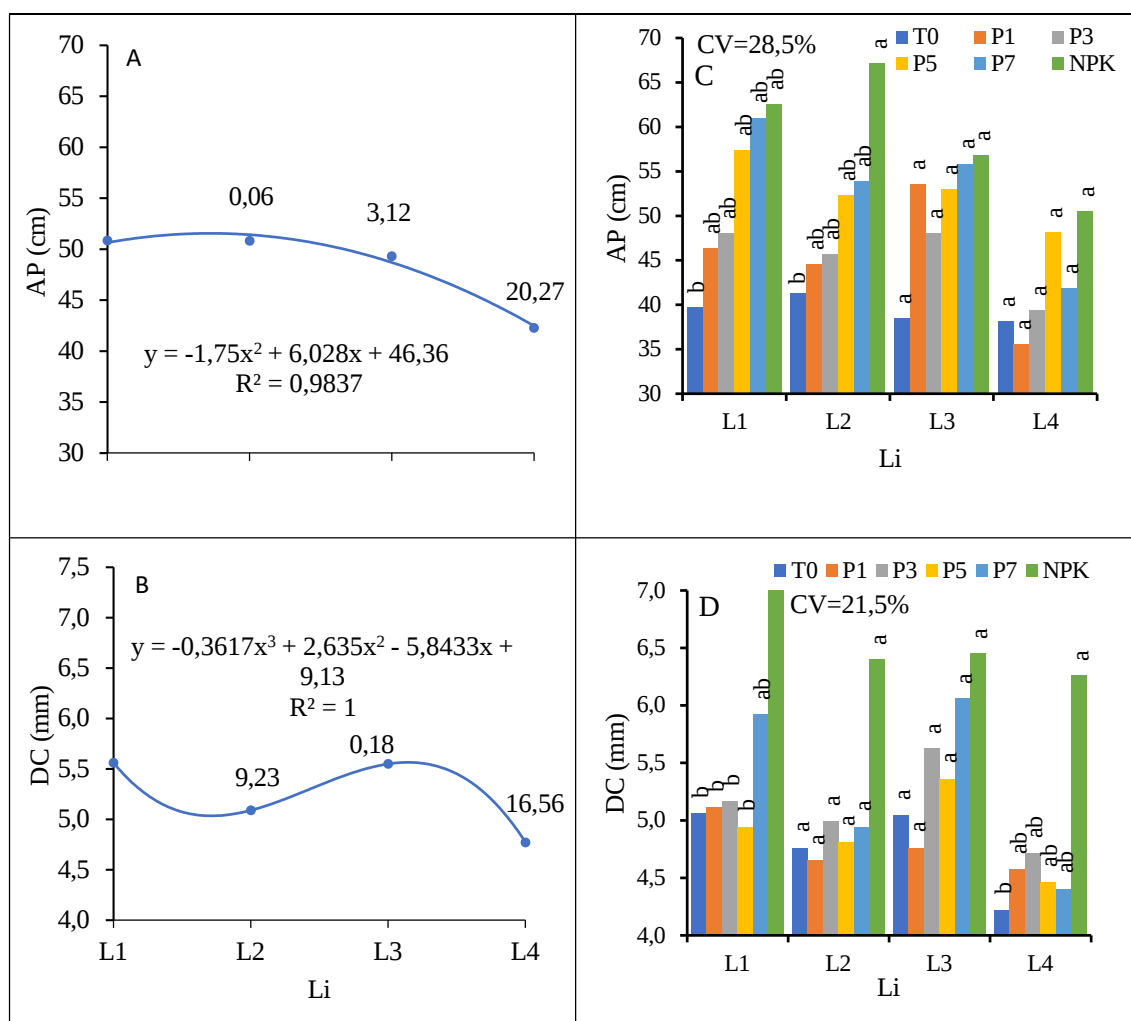


Figura 10. Altura da planta (AP) e diâmetro do coleto (DC) para as Li de L1, L2, L3 e L4 e variação (%) de L1 em relação a L4 (A e B), e, em função das doses de PR e NPK para cada Li (C e D).

Médias seguidas de letras minúsculas entre diferentes doses de PR e NPK para uma mesma lâmina de irrigação não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De maneira geral, houve somente tendência de elevação da AP e DC com aumento das doses de PR e das Li, correspondendo a uma variação de 20,27% e 16,56% entre as L1 e L4, respectivamente. Isso indica que maiores Li podem ter promovido a dissolução dos sais presentes no PR, promovendo um maior aproveitamento dos nutrientes disponíveis no solo, embora não tenha apresentado diferença significativa. Esses resultados corroboram, em parte, com os obtidos por Cunha *et al.* (2013) em estudo com diferentes Li, onde observaram que houve decréscimo de produção quando houve déficit hídrico entre 21 e 37% nas fases vegetativa e de 29% na fase reprodutiva do feijoeiro.

O solo utilizado no experimento possuía inicialmente baixos teores de fósforo, cálcio, magnésio e enxofre (Tabela 1), assim, a aplicação da maior dose de PR (7 t ha⁻¹), mais notadamente na maior Li (L1) (Figura 11C e 11D), bem como de NPK, favoreceram

o aumento da AP e DC, fato não observado por Silva *et al.* (2012) para a AP em feijoeiro utilizando o PR basáltico; os autores justificaram que tal resultado foi encontrado devido à aplicação de calcário antes do plantio e ao solo já apresentar originalmente elevado teor de fósforo e potássio.

Alovisi *et al.* (2021) analisaram AP e DC na cultura da soja com uso de PR basáltico nas doses de 0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0 t ha⁻¹ e adubação com NPK. Neste caso, o estudo evidenciou aumento tanto na AP como no DC para as parcelas adubadas com NPK, em comparação com todas as doses de PR.

A aplicação de 4 t ha⁻¹ de um PR com silício em sua constituição, óxido de alumínio, ferro, magnésio e, em baixas quantidades cálcio, sódio, potássio e fósforo foi observado que não houve incremento no DC quando comparado ao uso do fertilizante mineral (MAP 10-50-00) na dosagem de 150 kg ha⁻¹, para o cultivo do feijoeiro carioca (Duarte *et al.*, 2021).

O uso de NPK promoveu aumento no DC, sendo maior que em relação a T0, P1, P3 e P5 na L1e na L4 foi maior apenas em relação a T0 (Figura 11D), ou seja, o efeito da Li teve alguma influência quando do uso de 120% e 60% da ETc. Deste dado, infere-se que as maiores doses de PR, em destaque para P7, tiveram efeito similar ao TNPK.

O feijoeiro responde de maneira positiva a presença de P no solo, que pode ser fornecido via PR ou fontes sintéticas. Foi observado neste trabalho que o NPK resultou em maior DC nas L1 e L4, que pode ter sido devido a uma liberação P ao solo em doses adequadas. Ao usarem a adubação fosfatada com 20 kg ha⁻¹ (baixa dose) e 120 kg ha⁻¹ (alta dose) de P₂O₅ no plantio, Bezerra *et al.* (2014) observaram que a dose maior resultou em maior DC. Os autores concluíram que menores doses de P estariam associadas à menor AP, fato não observado neste trabalho, talvez pelo elevado CV (21,50%).

Houve interação entre as doses de PR e NPK e as Li para a MuAe, MsAe e MuRa, sendo que de maneira geral para estas variáveis, a L1 foi maior que a L4 em todas as doses de PR e NPK (Figuras 12A, 12B e 12C). Maiores lâminas de irrigação (L1 e L2) combinadas com adubação de NPK, promoveram maior MuAe ou MuRa, mostrando que o feijoeiro é responsivo ao déficit hídrico.

Prado *et al.* (2021) observaram valores, de modo geral, divergentes aos resultados encontrados neste experimento, onde concluíram que LI acima de 100% da ETc não promoveram ganhos adicionais para o feijoeiro em relação ao seu sistema radicular e Li inferiores a 100% (75% e 50% da ETc) prejudicaram o desenvolvimento da cultura do feijoeiro do grupo carioca.

O déficit hídrico tem um impacto significativo na produtividade de feijoeiro (Silva *et al.*, 2020), resultando em reduções na matéria seca e fresca. Estudos demonstram que a restrição de água durante períodos críticos do ciclo de crescimento das plantas, como na fase reprodutiva, pode diminuir substancialmente a biomassa (Benjamin *et al.*, 2014; Otegui *et al.*, 1995).

Fernandes *et al.* (2015) observaram que a falta de irrigação reduziu de forma significativa na produção de MsAe das plantas de feijoeiro, com variações dependendo da intensidade e duração dos períodos de seca. O déficit hídrico compromete o crescimento celular e a fotossíntese, afetando negativamente o desenvolvimento e a produtividade do feijoeiro (Kerbaudy, 2009, Silva *et al.*, 2023).

A MuAe foi menor no T0 em relação às demais adubações na L1 e L2, ao mesmo tempo, na L2 a adubação com NPK foi maior à todas as doses de PR. Na L3, T0, P1 e P3 foram menores à P5, P7 e NPK, porém na L4, apenas NPK foi maior a todas as doses de PR e a T0. Portanto, observa-se que com a redução da Li houve menor efeito das doses de PR, de forma que a produção de MuAe com 60% da ETc só foi influenciado de forma significativa quando do uso de NPK, mostrando com isso, interação entre as doses de PR e Li (Figura 12A). Já a MsAe foi maior nas doses de PR de P5 e NPK em relação às demais doses de PR apenas em L1 e L2, porém T0 foi inferior a todos os tratamentos (Figura 12B).

Por sua vez, a MuRa foi maior em NPK em relação a todos os demais tratamentos em L1, L2 e L3, já em L4, apenas T0 e P1 foram menores aos demais tratamentos. Ao mesmo tempo em L1, com exceção de NPK, todas as doses de PR e T0 foram iguais, o mesmo não ocorreu nas L2, L3 e L4, ou seja, a Li de 120% da ETc favoreceu a melhor remineralização do PR, de forma que mesmos as menores doses favoreceram equilíbrio no desenvolvimento da MuRa do feijoeiro.

Para a MsRa houve variação apenas entre as doses de PR, sendo que P0, P1 e P3 foram menores em comparação a P5, P7 e NPK nas lâminas L1 e L4 (Figura 12D). Viçosi *et al.* (2020) demonstraram que a adubação em doses elevadas de micronutrientes pode diminuir a MsRa, embora não tenha sido objeto deste estudo, pode ter sido um fator influenciador na MsRa do feijoeiro. Muitos valores, mesmo que apresentem amplitude entre eles elevada, não demonstraram variação significativa, motivado especialmente por apresentarem CV elevado, sendo de 20,7%, 32,5%, 22,8% e 31,5%, respectivamente, para a MuAe, MsAe, MuRa e MsRa.

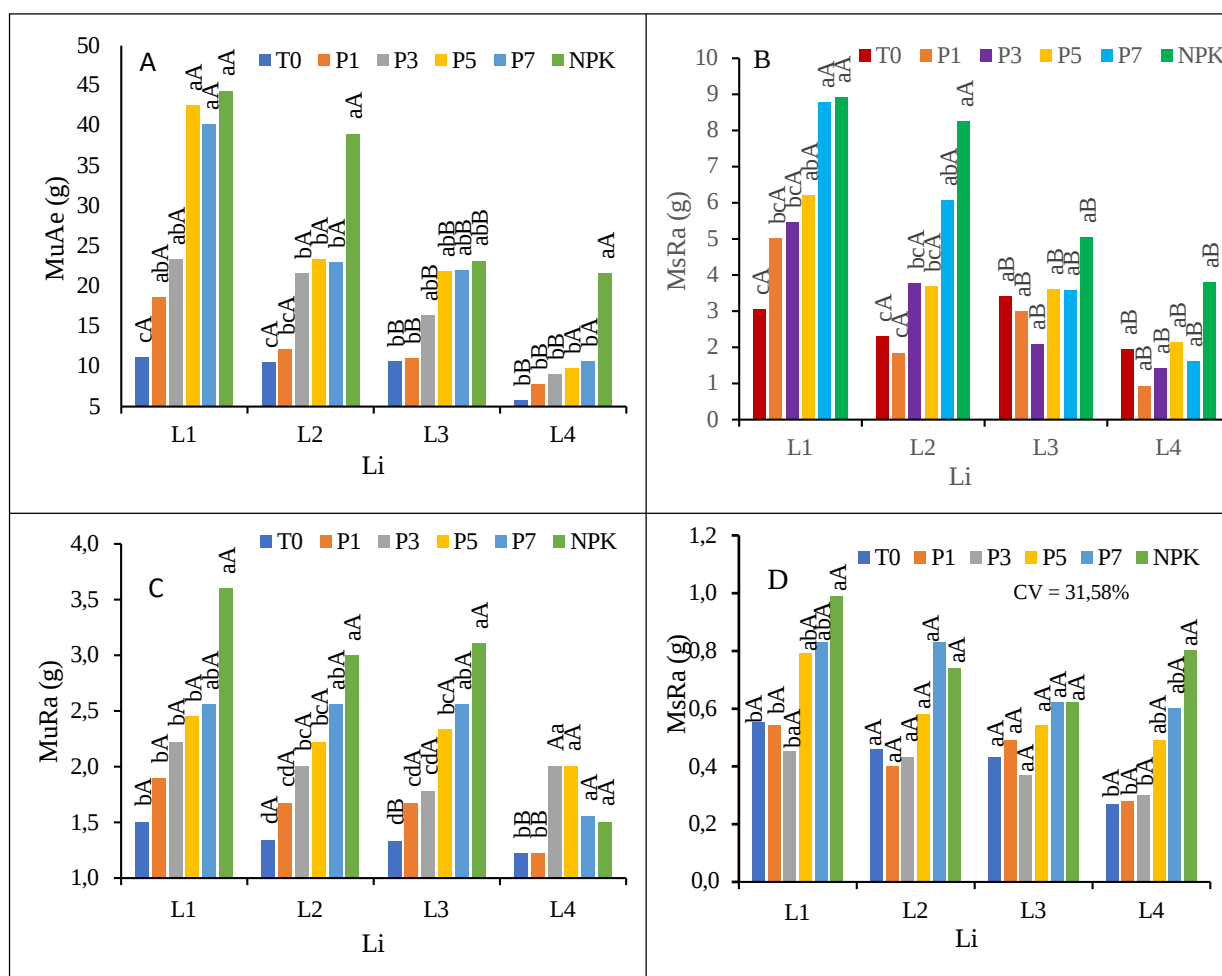


Figura 11. Massa úmida (MuAe) (A) e massa seca (MsAe) (B) da parte aérea, massa úmida (MuRa) (C) e massa seca (MsRa) (D) das raízes do feijoeiro para diferentes doses de pó de rocha (T0, P1, P3, P5, P7 e NPK) e lâminas de irrigação ((L1 = 120%, L2 = 100%, L3 = 80%, L4 = 60%))

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes lâminas de irrigação para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma lâmina de irrigação não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Conceição *et al.* (2018) por sua vez, ao aplicarem as Li de 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da ETo e Locatelli *et al.* (2013) com as Li de 30%, 60%, 90% e 120% da ETo, observaram melhores resultados para as maiores Li, demonstrando que o fornecimento de água acima da capacidade de campo (CC) pode promover o aumento da atividade metabólica e consequentemente o desenvolvimento dos parâmetros analisados do feijoeiro. Porém, uma análise econômica poderia indicar a viabilidade de Li acima da CC trariam benefícios ao agricultor. Recomendação essa fundamental quando da análise de interação entre as Li e PR, caso deste estudo, onde o processo de mineralização foi influenciado pelas Li, sendo mais notório na Li de 120% da ETc, onde, embora P5, P7 e

NPK foram iguais em termos de produção de MuAe, mas em valor absoluto, NPK foi maior que os demais tratamentos.

Souza *et al.* (2018) observaram resposta similar ao desse estudo ao avaliarem o feijoeiro carioca sob diferentes fontes de adubação, sendo estas: ureia, molibdato de sódio, P natural e NPK, e constataram aumento da massa seca da parte aérea associados ao uso de NPK. Rocha *et al.* (2018) observaram melhor resposta no desenvolvimento do feijoeiro caupi com doses intermediárias de fósforo, desaconselhando doses mais elevadas, que no experimento representavam doses acima de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 , fato que não foi observado nesse estudo, pois a adubação com NPK seguiu a demanda do cultivo nas condições do experimento, não houve sub dosagem, e quando não foi aplicada (T0 dose de PR) houve influência negativa na produção de MuAe e MuRa.

5.1.2 Atributos fisiológicos

As trocas gasosas estão apresentadas nas Figuras 13A a 13D. A condutância estomática (gs) (Figura 13A) e a taxa fotossintética (A) foram maiores sob adubação com NPK em relação ao T0 na L1 (120% da ETc) (Figura 13C) o mesmo ocorreu para a na L4 (Figura 13D). Como não houve variação significativa entre as Li, as Figuras 13B e 13D apresentam os valores médios das doses de P1, P3, P7 e NPK para cada Li, respectivamente para gs e A. Assim, ajustou-se um modelo do tipo polinomial de segundo grau, com elevado valor de coeficiente de determinação (R^2) para gs, sendo de 0,9145 e 0,6215 para A.

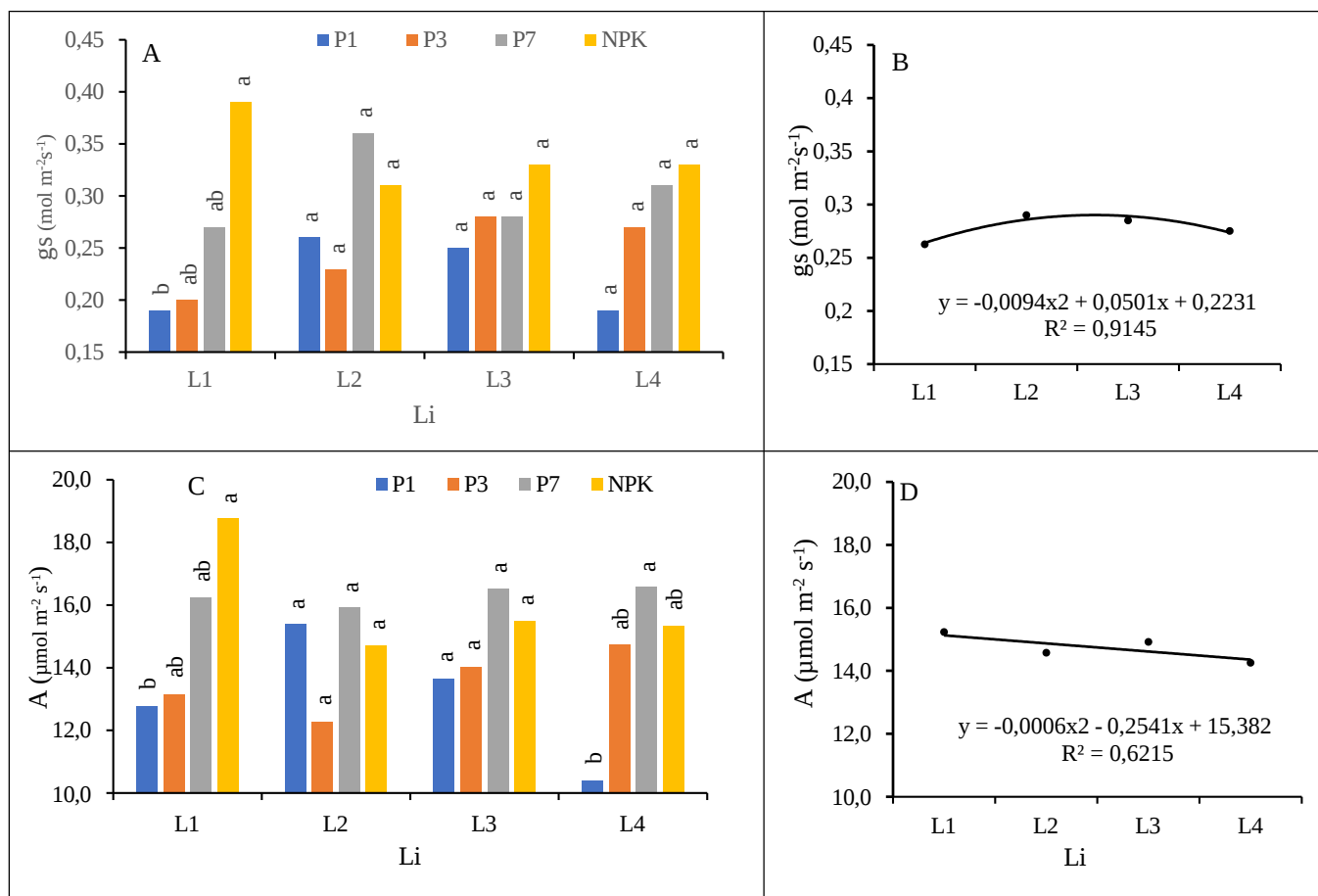


Figura 12. Valores condutância estomática (gs) e taxa fotossintética (A) para as dosagens de pó de rocha (P1, P3, P7) e NPK e Li (L1 = 120%, L2 = 100%, L3= 80% e L4 = 60% da ETc).

Médias seguidas de letras minúsculas entre diferentes doses de PR e NPK para uma mesma lâmina de irrigação não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Com o aumento das Li, os nutrientes podem ter sido melhor absorvidos pela planta, especialmente no NPK, suprindo fisiologicamente a planta, conforme observado por Fernandes *et al.* (2015) e Gong *et al.* (2022) em experimentos com feijoeiro. Ao mesmo tempo o aumento das doses de PR ou o NPK tenderam a elevar as trocas gasosas do feijoeiro, como observado para a gs e A, sendo potencializados com o efeito da Li, que embora não tenha variação significativa entre as Li, em valor absoluto diminuíram em função da redução da Li, especialmente do valor de A, reduzindo de 15,3 para 14,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ entre L1 e L4, redução de apenas 7,75%

Por sua vez L2 e L3 não mostraram variação significativa a 5% de probabilidade, mas em L4 houve variação, demonstrando que sob estresse hídrico severo, tanto a aplicação de NPK e as diferentes doses de PR apresentaram valores semelhantes na taxa fotossintética (Figuras 13C e 13D), o que corrobora, em parte, com estudo de Galo *et al.*

(2016), que demonstraram que a variação nas Li impactou diretamente a eficiência fotossintética e a condutância estomática. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva *et al.* (2023), onde obtiveram drástica redução na gs e A em feijoeiro sob estresse hídrico severo.

Esses estudos, assim como no presente trabalho, demonstram que a combinação de práticas adequadas de irrigação e fertilização podem aumentar significativamente a gs e A, resultando em melhor desempenho das plantas do feijoeiro.

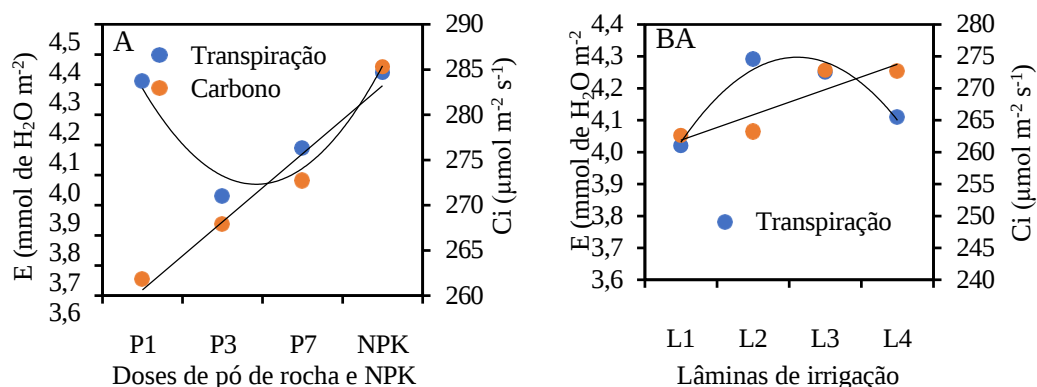
Fariña *et al.* (2022) encontraram incrementos na A relacionados à maiores doses de fósforo para o feijoeiro carioca. Já Moreira e Malavolta (2004) concluíram que as variáveis A e gs aumentaram com a maior disponibilidade de K, que é o responsável pela abertura e fechamento estomático, alegando que as condições hídricas foram adequadas, o que facilitou a disponibilidade e assimilação dos componentes minerais.

Souza (2021) verificou que as plantas de feijoeiro sob estresse hídrico diminuem progressivamente as taxas de gs e A. Além disso, Moreira *et al.* (2015) ao avaliarem as Li de 40, 60, 80, 100 e 120% da ETo para feijoeiro, concluíram que a Li de 120% da ETo proporcionou melhores trocas gasosas, elevando o desempenho das atividades de E e gs.

Em relação à transpiração (E) carbono interno nas folhas (Ci) não houve interação significativa entre as doses de PR e NPK e as Li. Comparando tais resultados obtidos com Aquino *et al.* (2020) observa-se aspectos em comum, pois a maiores doses de P e K provavelmente estão alocadas nas parcelas com uso de NPK, uma vez que o PR no primeiro ano ainda não tem completa dissolução no solo.

Observou-se que na L4 (60% da ETc) a redução de gs entre o NPK e P1 foi de 73,80%, demonstrando que plantas bem nutridas toleram o estresse hídrico, ao mesmo tempo, a irrigação sem déficit hídrico favorece o melhor desempenho fisiológicos das plantas de feijoeiro como observado por Nascimento *et al.* (2011), que, ao aplicaram diferentes Li para testar a tolerância do feijoeiro ao déficit hídrico, observaram que a menor Li correspondente a 50% da ETo apresentou os menores valores de gs, com decréscimo de 72% em relação à maior Li (120% da ETo).

A transpiração (E) não apresentou diferença significativa em função das doses de PR e de NPK e das Li, sendo o maior valor absoluto de $4,33 \text{ H}_2\text{O m}^{-2}$ foi obtido no NPK e o menor de $3,92 \text{ H}_2\text{O m}^{-2}$ em P3, com redução de 10,18% entre estes; e menor valor de $4,02 \text{ H}_2\text{O m}^{-2}$ para L1 e o maior de $4,29 \text{ H}_2\text{O m}^{-2}$ para a L4, demonstrando que em função das condições do experimento, as Li apresentaram valores de E praticamente iguais, ou seja, variação entre o maior e menor valor de apenas de 6,72% (Figura 14A e 14B).



$$Ci = 7,53x + 253,1$$

$$R^2 = 0,9507$$

$$Ci = 3,959x + 257,91$$

$$R^2 = 0,8151$$

$$E = 0,1575x^2 - 0,7625x + 4,8925$$

$$R^2 = 0,91$$

$$E = -0,1025x^2 + 0,5355x + 3,5975$$

$$R^2 = 0,953$$

Figura 13. Transpiração (E) e carbono interno (Ci) para as dosagens de pó de rocha (P1, P3, P7) e NPK (A) e lâminas de irrigação (L1 = 120%, L2 = 100%, L3 = 80% e L4 = 60% da ETc).

Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O teor de Ci foi maior em NPK em relação a P1, com aumento gradativo entre as doses de PR e até a adubação com NPK, variando de 261,83 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em P1 até 285,29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em NPK, com aumento de 8,96% (Figura 14A). Em função das Li não houve diferença significativa, com valor menor valor de 262,60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em L1 e de maior de 278,80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em L2, variação de apenas 3,88%, ou seja, menor amplitude em relação as doses de PR ou NPK.

O aumento do carbono interno nas folhas de plantas submetidas a maiores doses de nutrientes minerais está diretamente relacionado ao aprimoramento da fotossíntese, processo fundamental para o crescimento e desenvolvimento vegetal (Malavolta, 2006)

A aplicação de adubos, especialmente os nitrogenados, eleva a concentração de nutrientes essenciais no solo, o que, por sua vez, intensifica a atividade fotossintética das plantas. O nitrogênio é um componente vital da clorofila, pigmento responsável pela captura de luz durante a fotossíntese. Com mais clorofila, as plantas conseguem realizar a fotossíntese de maneira mais eficiente, fixando maiores quantidades de carbono atmosférico na forma de carboidratos. Esses carboidratos são armazenados nas folhas, aumentando o teor de carbono interno (Taiz *et. al*, 2017), conforme verificou-se no TNPK.

Salienta-se ainda que nutrientes como fósforo, potássio e magnésio também desempenham papéis cruciais na fotossíntese e no metabolismo energético das plantas. A adubação adequada promove o desenvolvimento de folhas mais saudáveis e eficientes na captura de luz e na troca gasosa, otimizando a assimilação de carbono (Marschner, 2012).

Em relação ao carbono interno nas folhas (Ci) Souza *et al.* (2018) obtiveram que o uso de adubos químicos (NPK) com ureia, P natural e molibdato de sódio não interferiram neste parâmetro na folha e tampouco na taxa fotossintética das plantas de feijoeiro carioca, discordando com os dados encontrados neste estudo, onde houve melhor desempenho em NPK para Ci e A.

Pereira *et al.* (2021) verificaram que a medida que houve decréscimo na Li (entre 100, 65, 44 e 28% da Etc.) houve também menores índices associados aos parâmetros E e Ci, de modo divergente ao verificado neste experimento.

A EiC apresentou diferença significativa entre as doses de P apenas em L4, mas não entre as Li, sendo superior em P3, P7 e NPK (Figura 15). Esses resultados sugerem que sob déficit hídrico severo a planta requer maior aporte nutricional para conseguir manter a sua capacidade de converter CO₂ atmosférico em biomassa, em uma tentativa de manter a continuidade do processo de crescimento e produtividade desta cultura.

A EiC reflete a eficiência com que o CO₂ assimilado é convertido em biomassa durante a fotossíntese. Em condições de deficiência hídrica severa, como a verificada em L4, essa eficiência pode ser reduzida devido a uma série de fatores fisiológicos e bioquímicos que comprometem a atividade do ciclo de Calvin-Benson e o funcionamento dos estômatos, sendo efeitos previstos o fechamento estomático; o acúmulo de espécies reativas de oxigênio, que reduz a taxa de assimilação do carbono; além de danos estruturais e metabólicos devido degradação da estrutura celular e do aparato fotossintético (como os tilacóides), prejudicando a produção de energia (ATP e NADPH) necessária para o ciclo de Calvin. Esses fatores combinados reduzem a capacidade da planta de converter CO₂ em açúcares, diminuindo diretamente a EiC (Taiz *et.al.*, 2021).

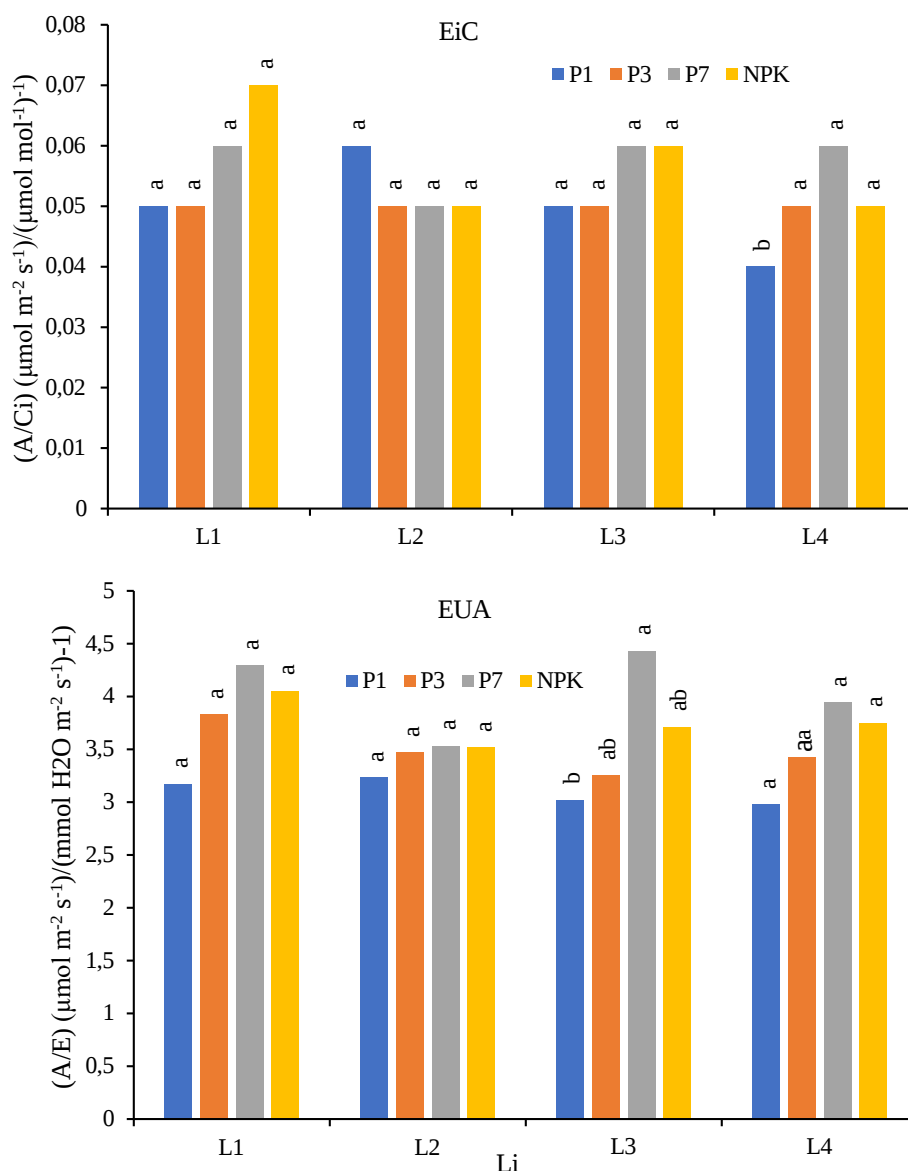


Figura 14. Eficiência instantânea da carboxilação (EiC) e eficiência no uso de água (EUA) para as dosagens de pó de rocha (P1, P3, P7) e NPK (A) e lâminas de irrigação (L1, L2, L3 e L4). Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre diferentes lâminas de irrigação dentro de cada dose de PR e NPK não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Já a EUA apresentou diferença significativa entre as doses de PR apenas para L3, mas não entre as Li, onde maior valor foi em P7 (Figura 15). Sob déficit hídrico a planta tende a aumentar a sua eficiência para o uso da água, de modo a ser mais econômica em sua demanda hídrica, por sua vez, Faria *et al.* (2012), em experimento com feijoeiro no semiárido brasileiro, não observaram variação significativa em diferentes lâminas de irrigação em relação à EUA, concordando com este trabalho, com exceção na L3.

Jacinto Júnior *et al.* (2019) observaram que à medida que houve deficiência hídrica em experimento com feijoeiro houve também diminuição tanto em relação à EiC quanto

em relação à EUA, resultado oposto ao encontrado neste experimento. Experimento de Ramos *et. al.* (2014) demonstrou que a redução das lâminas de irrigação potencializou a EUA, sendo que o melhor índice foi alcançado com lâmina correspondente a 80% da ETc para o feijoeiro caupi.

De acordo com Taiz e Zeiger (2009), quando o estresse hídrico é moderado pode-se observar um melhor desempenho para a EUA, em decorrência da taxa fotossintética da folha não ser tão responsiva ao estresse hídrico moderado quanto à expansão foliar, pois a fotossíntese é menos sensível ao turgor do que a expansão foliar. Deste modo, é possível observar mais CO₂ por unidade de água transpirada. Fisiologicamente a planta promove o fechamento estomático com mais eficiência para a inibição dos processos de transpiração, sendo menos eficiente para promover a redução das concentrações intercelulares de CO₂.

5.2 Resultados da soja

5.2.1 Análise de variância e atributos morfológicos da soja

O resultado da análise de variância da AP e DC da soja estão apresentados na Tabela 02, onde observa-se que houve interação a 5% de significância para AP aos 90 DAS e DC aos 45 dias apenas em L4 para as diferentes adubações.

Tabela 2. Análise de variância dos atributos morfológicos da soja em função das doses de PR e NPK e Li.

Fator de variação	GL	Valores de Quadrados Médios			
		AP45	AP90	DC45	DC90
PR	5	55,37 ^{ns}	72,42 ^{ns}	6,38 ^{***}	10,39 [*]
Li	3	78,11 ^{ns}	247,24 ^{**}	4,06 ^{**}	10,31 ^{ns}
PRxLi	15	22,53 ^{ns}	76,74 ^{ns}	1,17 ^{ns}	3,73 ^{ns}
CV (%)	48	12,94	10,42	17,22	24,80
Fator de variação	GL	Valores de Quadrados Médios			
		NV	NG	PMS	Prod.
PR	5	709,18 ^{ns}	0,12 ^{ns}	557,93 ^{ns}	5163,16 ^{***}
Li	3	3552,94 [*]	0,85 ^{***}	611,93 ^{ns}	1007,90 ^{ns}
PRxLi	15	444,04 ^{ns}	0,28 ^{ns}	397,81 ^{ns}	1021,14 ^{ns}
CV (%)	48	42,75	22,76	15,90	17,89

Altura da planta aos 45 dias (AP45), Altura da planta aos 90 dias (AP90), Diâmetro de coleto aos 45 dias (DC45), Diâmetro de coleto aos 90 dias (DC90), Números de Inserções de Vagem (NV), Fitomassa seca aérea (FSA), Massa fresca radicular (MFR), Massa seca radicular (MSR) e Área foliar (AF), GL: graus de liberdade; ***: P<0,001; **:P<0,01; *: P<0,05; ns: Não significativo.

A AP foi menor em T0 e TNPK para DC, além de T0, já P1 foi menor em relação aos demais tratamentos (Figuras 16A e 16D). Estes resultados divergem de outros autores, como Bui *et al.* (2022), que investigaram os efeitos da irrigação no crescimento de 200 genótipos de soja no Japão ao longo de 3 anos e observaram diferenças significativas nas diferentes Li. Para as condições de reposição de água com $ET_c = 100\%$, os autores identificaram acréscimo em vários parâmetros de crescimento, incluindo a AP. Para o mesmo experimento houve ainda ganhos para os parâmetros avaliados quando a Li foi inferior a 100% da ET_c para a EUA e o desenvolvimento das raízes, o que indicou que a irrigação controlada pode aumentar a resiliência das plantas à seca e melhorar o rendimento da cultura de soja, nas condições daquele experimento.

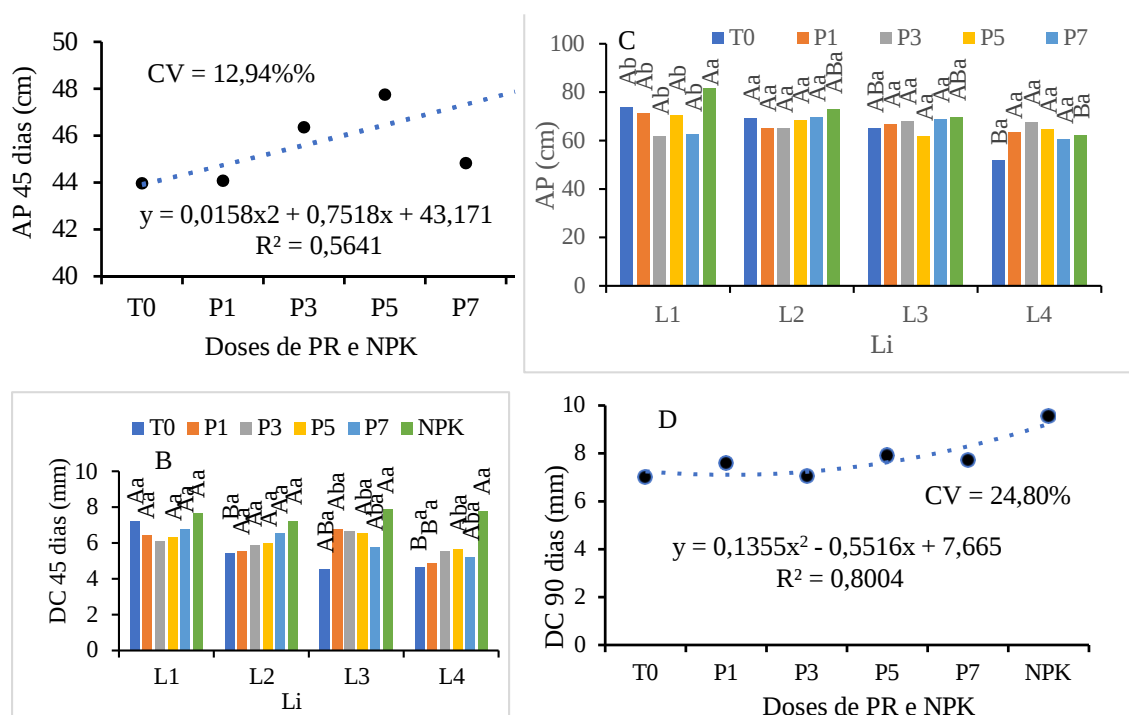


Figura 15. Altura da planta (AP) e diâmetro do coleto (DC) para as Li de L1, L2, L3 e L4 e PR (P1, P3, P7) e NPK.

Médias seguidas de letras minúsculas entre diferentes doses de PR e NPK para uma mesma lâmina de irrigação e maiúscula entre diferentes lâminas de irrigação para uma mesma dose de pó de rocha e NPK não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A AP da soja tende a ser maior nas Li de L1 e L2 na adubação com NPK (Figura 2C), devido à manutenção da turgidez celular, que favorece o alongamento celular e o crescimento dos tecidos vegetais (Taiz *et al.*, 2021). Em contrapartida, déficits hídricos moderados ou severos limitam a expansão celular, reduzindo a altura das plantas, especialmente em estádios fenológicos críticos, como o florescimento e o enchimento de

grãos (Rosa *et al.*, 2018). A deficiência hídrica reduz a eficiência do transporte de fotoassimilados para os meristemas, impactando negativamente o crescimento vertical (Taiz *et al.*, 2017).

O DC aos 45 DAS foi menor na Li de L4 em T0 e na dose de PR de T1. Além disso, em L4 observou-se maiores valores em NPK em relação a P1 e T0 (Figuras 16B). Para as Li de L1 a L3, mesmo que somente em valor absoluto, o DC com o uso de NPK foi maior à T0 e doses de PR. Esse resultado diverge de Rodrigues (2020) que utilizou em um experimento os tratamentos diversas dosagens de PR de origem basáltica com ou sem adubação convencional de NPK na formulação 05-25-06 na dose 200 kg ha⁻¹ e obteve para AP dados que mostram que as parcelas foram influenciadas pela adição da adubação química complementar, com os maiores valores nos tratamentos que receberam a adubação química, o que levou a conclusão que a pequena liberação dos nutrientes do pó de basalto indicou que tal material não pode ser utilizado como a principal fonte de nutrientes para a soja.

O DC é altamente sensível à disponibilidade hídrica e nutricional. A irrigação adequada promove o transporte eficiente de água e nutrientes pelo xilema, estimulando o crescimento em espessura por meio da atividade do câmbio vascular (Taiz *et al.*, 2021). Por outro lado, a aplicação de PR, como fonte de liberação lenta de nutrientes, pode melhorar a estrutura do solo e fornecer minerais essenciais, como potássio e silício, que auxiliam no desenvolvimento do caule (Melo *et al.*, 2019).

Sabe-se que os diferentes tipos de adubação são variáveis determinantes ao pleno desenvolvimento da soja. Adubos químicos, como o NPK, devido à sua alta solubilidade, oferecem nutrientes prontamente disponíveis, o que acelera o crescimento inicial das plantas e aumenta a AP e o DC, especialmente quando associados a irrigação adequada (Raij, 2011), conforme verificado em L4 (Figura 16B). Em contrapartida, o uso exclusivo do PR pode apresentar resultados mais lentos, pois os nutrientes são liberados gradualmente, o que pode limitar o crescimento em condições de déficit hídrico ou quando a demanda nutricional da planta é alta (Melo *et al.*, 2019).

Barzotto *et al.* (2016) testaram diferentes Li e diferentes doses de nitrogênio para a soja e observaram que não houve interação entre os fatores Li e adubação, mas quando analisaram somente a Li de forma isolada para AP, esta mostrou que para as maiores Li (100 e 120% de ETc) houve um maior crescimento da AP, de forma similar a este experimento.

Os resultados de AP aos 45 DAS e DC aos 90 DAS foram semelhantes aos encontrados por Redin *et al.* (2023), que testaram os seguintes tratamentos: 5, 10, 20, 40,

60, 80, 120, 160 e 200 t ha⁻¹ de PR, NPK e testemunha e observaram que a AP não foi influenciada por nenhum destes tratamentos, assim como Schweder *et al.* (2018) que avaliaram o desempenho da soja nas doses de 0,1,5; 3,0; 6,0 e 12 t ha⁻¹ de PR de origem ardósica e também não evidenciaram variação para AP.

Outro estudo realizado no Uruguai por Giménez *et al.* (2017), explorou o rendimento e a eficiência do uso da água pela soja sob vários regimes de irrigação, sendo que estes incluem irrigação com déficit moderado e severo, e cultivo de sequeiro. Embora este estudo tenha se concentrado principalmente na produção e no conteúdo de água do solo, ele forneceu informações sobre como diferentes Li podem influenciar o crescimento das plantas. Os resultados indicaram que as Li mais próximas das ideais são cruciais para manter um bom crescimento das plantas, incluindo DC e AP, sendo que estes parâmetros apresentaram maiores valores quando fornecida ET_c de 100%, o que não foi verificado neste experimento.

De modo similar Luchese *et al.* (2023), testaram a correlação do uso de PR basáltico (0,2,4,6 t ha⁻¹) e do adubo químico (PK) com o desenvolvimento de DC e AP na soja, e verificaram que nos vasos onde foi disponibilizado o PR houve um aumento significativo da matéria seca quando comparado à aqueles que receberam adubo químico, concluindo que a aplicação do PR resultou em aumentos significativos no rendimento das culturas e no potencial de sequestro de CO₂, demonstrando que para aquele experimento o PR pode ser uma ferramenta eficaz para melhorar a fertilidade do solo de maneira sustentável, o que foi verificado neste experimento apenas para AP aos 90 dias em L4.

Rodrigues (2023) utilizou T0, TNPK e PR nas doses 2.500 kg ha⁻¹ e 5.000 kg ha⁻¹ e obteve maior desempenho para DC com a dose de 2.500 kg ha⁻¹, demonstrando um poder de reação de PR em doses menores para a soja nas condições do seu experimento, diferindo do que foi encontrado neste experimento, onde não houve diferenciação entre as doses de PR.

Em relação ao número de inserções de galhos (NG), número de vagens (NV), produtividade (Prod) e Peso de Mil Sementes (PMS), observou-se que NG e PMS não apresentaram diferença significativa entre os fatores e nem entre estes de forma isolada (Figuras 3A, 3C, 3E e 3G), o mesmo foi observado por Almeida Júnior *et al.* (2022) para o NG, NV e PMS ao usarem diferentes doses de PR (0, 2, 4, 6, 8 e 10 t ha⁻¹) de origem de micaxisto e basalto e adubo químico convencional, onde apenas para NV houve maior valor em NPK.

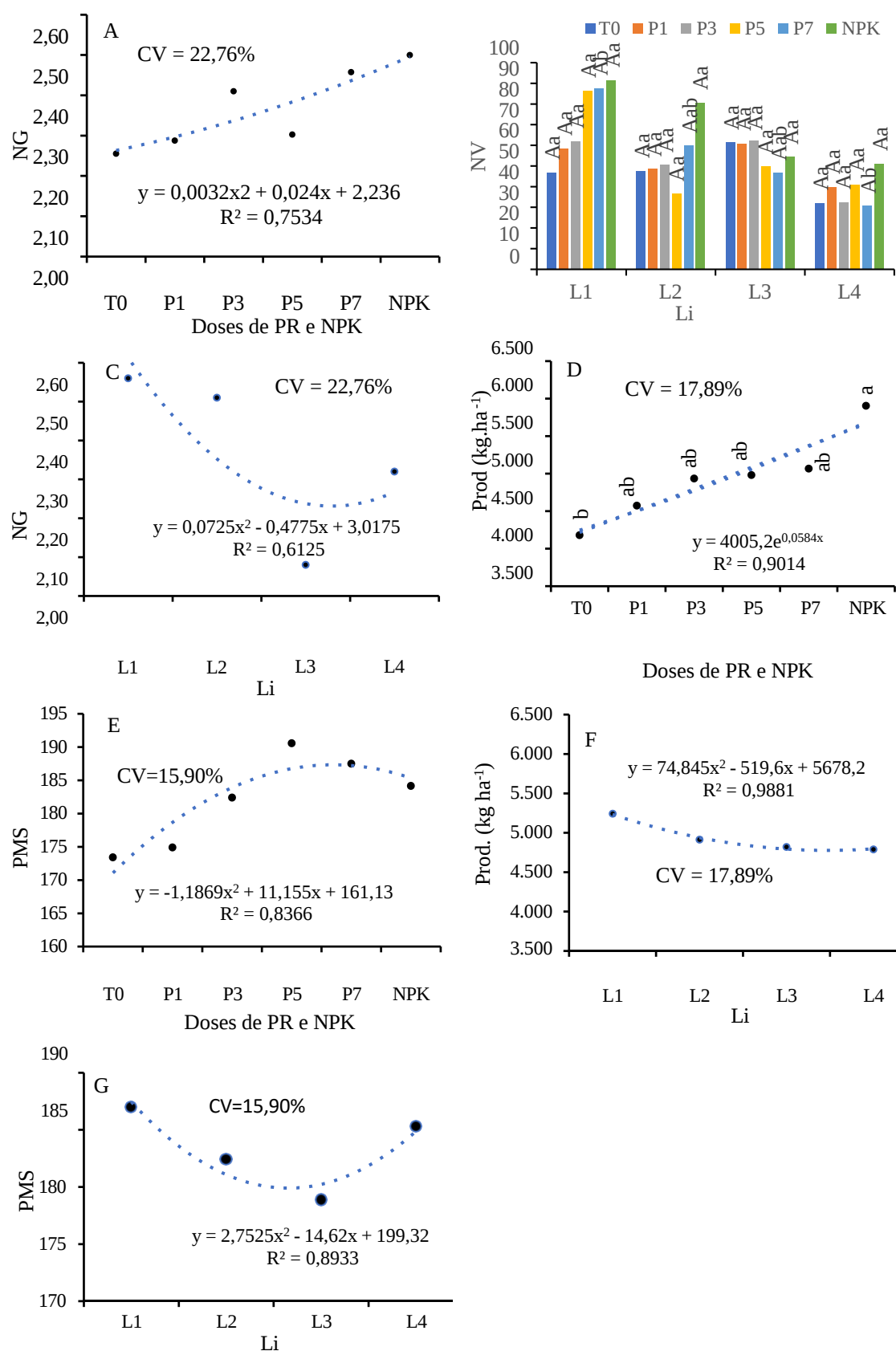


Figura 16. Número de Inserções (NG), Número de Vagens (NV), Peso de Mil Sementes (PMS) e Produtividade (Prod) para as Li, em função das doses de PR e NPK para cada Li. Médias seguidas de letras minúsculas entre diferentes doses de PR e NPK para uma mesma lâmina de irrigação não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Rodrigues (2020) testou diferentes doses de PR (0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0 t ha⁻¹) e adubo químico e observou que ao usar adubo químico houve maior PMS de soja, o mesmo foi observado nesse estudo, onde houve apenas tendência de aumento do PMS em função da elevação das Li e de doses de PR (Figura 17E e 17G), com 8,94% entre T0 e P5. Já Redin *et.al* (2023) testaram diferentes doses de PR para o desenvolvimento da soja, onde observaram variação significativa e superior a adubação com NPK para NV, PMS e Prod. em amostras onde foi disponibilizado doses de PR superiores a 40 t ha⁻¹. Os autores descrevem como viável a utilização de PR nos solos, uma vez que pode haver a completa substituição de adubos químicos e teoricamente o PR não necessita de ser reaplicado com frequência. Porém há de se destacar o excessivo volume de PR necessário para esta operação, nas condições do experimento.

A produtividade (Prod) variou quando analisados os dados de adubação isolados, mas não houve interação entre os dois fatores, onde T0 foi menor que NPK (Figura 17D), sendo o ajuste com polinômio de segundo grau resultou em $R^2 = 0,8950$, onde a Prod. média das 4 Li com o uso de NPK foi de 5.905,09 kg ha⁻¹, enquanto que em T0 foi 4.180,55 kg ha⁻¹ (Figura 17D), aumento de 29,21%. Porém não houve variação entre as Li, embora houve tendência de redução da Prod. com diminuição da Li, sendo de 8,66% entre NPK e T0, com $R^2 = 0,9881$. Considerando a média das adubações dentro da Li de L1, a prod. foi de 5.242,28 kg ha⁻¹ e na L4 foi de 4.912,04 kg ha⁻¹, redução de 6,30% (Figura 17F). Cada incremento nos níveis de adubação reflete uma resposta positiva da planta, sugerindo que o fornecimento gradual de nutrientes pode maximizar a absorção e a eficiência de uso pelas plantas, como observado por Malavolta (2006).

A prod. média da soja no ano 2023/2024 no Brasil sofreu redução de 8,2%, passando de 4.072 kg ha⁻¹ para 3.739 kg ha⁻¹ na safra passada (Conab, 2024). Essa redução foi em grande parte devido às adversidades climáticas provocadas pelo advento do fenômeno climático denominado super El Niño, que teve sua maior intensidade na época da safra em questão, com extremos de temperaturas máximas e ausência de chuvas com veranicos prolongados. Observa-se que todos os tratamentos se mantiveram superiores a safra 2023/2024, sendo que com o uso de NPK foi 31% superior. Variações no clima, tipo de solo e outros fatores ambientais podem levar a diferenças na Prod. e nas interações entre os fatores, mesmo sob práticas de manejo semelhantes (Bastidas *et al.*, 2008).

De acordo com Taiz *et al.* (2017), o nitrogênio é fundamental para a síntese de proteínas e o crescimento vegetativo; o fósforo para o desenvolvimento de raízes e a transferência de energia; e o potássio melhora a eficiência no uso da água e a resistência

a estresses. Em relação ao potássio todos os tratamentos tiveram acesso a sua fonte, pois o solo é naturalmente rico neste nutriente. Porém, de modo geral o tratamento NPK, que supriu as necessidades de P, deixando este prontamente disponível, reflete o impacto positivo do suprimento adequado e balanceado de nutrientes no desenvolvimento de culturas de alto rendimento.

Fageria *et al.* (2011), afirmam que a aplicação balanceada de nutrientes promove uma maior eficiência fotossintética e crescimento da biomassa, fatores que diretamente afetam a produtividade final. Além disso, a adubação inadequada ou insuficiente pode limitar severamente a capacidade de produção da soja, conforme discutido por Marschner (2012), que observa que a carência de um único nutriente essencial pode restringir o crescimento mesmo que outros nutrientes estejam em níveis adequados.

É importante considerar que, embora a adubação intensiva, como no caso do NPK, promova uma produtividade maior, essa prática deve ser equilibrada com a sustentabilidade do sistema agrícola. Concentrações elevadas de nutrientes podem aumentar os riscos de lixiviação e poluição do solo e da água (Fageria *et al.*, 2011). Portanto, a escolha do tipo e da quantidade de adubação deve considerar a capacidade de absorção das plantas e o manejo adequado do solo para reduzir impactos ambientais, conforme discutido por Malavolta (2006) que destaca que a adubação deve ser equilibrada para suprir as necessidades da planta sem causar excesso de nutrientes no solo, o que poderia resultar em lixiviação e contaminação ambiental.

5.2.2 Atributos fisiológicos da soja

As variáveis A, Ci e EiC apresentaram variação significativa apenas entre as Li (Tabela 3). Observa-se ainda que os valores do CV foram elevados para os atributos fisiológicos avaliados, com exceção do Ci (9,15%), chegando a 52,25% para A.

Tabela 3. Análise de variância dos atributos fisiológicos da soja em função das doses de PR, NPK e Li.

Fator de variação	GL	Valores de Quadrados Médios					
		gs	A	E	Ci	EiC	EUA
PR	5	0,016 ^{ns}	16,73 ^{ns}	1,76 ^{ns}	442,38 ^{ns}	0,001 ^{ns}	2,00 ^{ns}
Li	3	0,013 ^{ns}	240,29 ^{***}	3,48 ^{ns}	5276,1 ^{***}	0,003 ^{**}	8,75 ^{ns}
PR x Li	15	0,007 ^{ns}	22,46 ^{ns}	1,89 ^{ns}	313,56 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	2,80 ^{ns}
CV (%)		52,54	27,82	38,35	9,15	28,24	40,62

Condutância estomática (gs), Fotossíntese (A), Transpiração (E), Carbono interno da folha (Ci), Eficiência de carboxilação (EiC) e Eficiência de Uso de Água (EUA), GL: graus de liberdade; ***: P<0,001; **:P<0,01; *: P<0,05; ns: Não significativo.

O C_i (Figura 18A) é um indicador importante de vários processos fisiológicos e sistêmicos e que refletem aspectos críticos do crescimento e da saúde das plantas, referindo à concentração de dióxido de carbono (CO_2) no espaço intercelular das folhas, e que está diretamente relacionado à atividade fotossintética, faz-se necessário a análise conjunta com o fator A. Assim, quando a fotossíntese é eficiente, as folhas absorvem CO_2 mais rapidamente, o que pode levar a uma redução na concentração de C_i (Farquhar *et al.*, 1980).

A variável A (Figura 18B) mostra que não houve variação significativa para a variável adubação. Os maiores valores de C_i foram observados em L4 e os menores em L1, o que quer dizer que houve maior acúmulo de C_i onde houve menor Li, ou seja, a assimilação de carbono nesse caso foi menos eficiente, tal qual a taxa fotossintética (Figura 18A). O comportamento da A indica que a planta consegue assimilar menos CO_2 , pois estando em um nível de estresse hídrico maior pode haver a tentativa de elevar a taxa fotossintética, buscando minimizar os efeitos da baixa umidade no solo e ou decréscimo fisiológico associado.

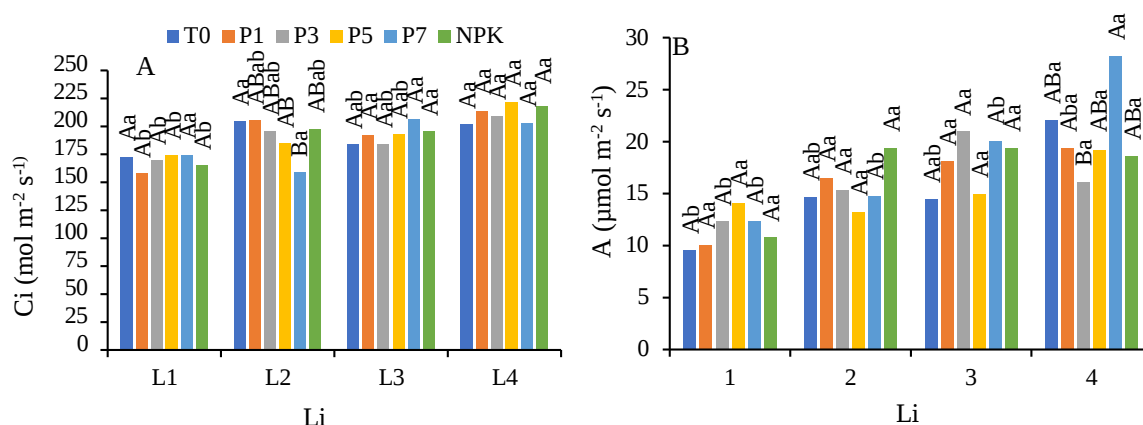


Figura 17. Níveis de C_i e A em função das doses de PR e NPK para cada Li.

Médias seguidas de letras minúsculas entre diferentes doses de PR e NPK para uma mesma lâmina de irrigação e maiúsculas entre diferentes Li para uma mesma dose de PR ou NPK, não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para Medrano *et al.* (2002) estresses abióticos, como seca, alta salinidade ou temperaturas extremas, afetam a capacidade das plantas de fixar carbono. Estes estresses podem levar a fechamento dos estômatos para conservar água, resultando em uma alta concentração de CO_2 interno devido à redução da fotossíntese. Santos (2018) testou o efeito do estresse hídrico para a soja com redução das lâminas em 30 e 50% e observou que em situações de déficit hídrico mais acentuado houve um decréscimo na taxa de

fotossíntese, mesmo as taxas de C_i não variando em seu experimento, diferente do que foi verificado neste estudo.

Observou-se os maiores valores de g_s na dose de PR de P7 na Li de L1 em relação a P1, T0 e NPK (Figuras 19A), sendo cerca de 400% superiores em relação a T0 e P1. Já em P3 e NPK houve um acréscimo de cerca de 300% em P7, e de cerca de 50% entre P5 e P7, onde, mesmo com elevada variação entre os valores, não houve variação significativa, que deve estar relacionada a grande dispersão entre os valores medidos ($CV = 52,54\%$).

A adubação de PR em doses mais elevadas (5 e 7 t ha⁻¹) favorece a de condutância estomática, notadamente na Li de L1, o pode interferir, portanto, no desempenho fotossintético da planta de soja.

A g_s é um parâmetro fundamental para entender a EUA e a regulação do CO₂ durante a fotossíntese. Em estudos anteriores, como os descritos por Flexas *et al.* (2006), a g_s foi identificada como um parâmetro sensível ao estresse hídrico e outros fatores abióticos. Segundo estudo de Silva *et al.* (2020), a aplicação de Li adequadas mantém uma pressão de água ideal, resultando em maior condutância estomática e, consequentemente, maior taxa de fotossíntese.

Embora não tenha sido encontrada na literatura um aumento em g_s relacionado especificamente à adubação com PR, é uma variável fisiológica que faz referência ao fluxo gasoso (CO₂ e H₂O) entre a folha e a atmosfera, representando um importante indicador da resposta das plantas às condições ambientais e ao manejo agrícola, incluindo a adubação (Lima *et al.*, 2016).

A transpiração não apresentou diferença significativa entre os fatores, mas observa-se que foram mais estáveis em função das doses de PR e NPK, variando de 3,09 (T0) a 3,41 mmol m⁻²s⁻¹ (NPK), embora houve apenas tendência de elevação, variando 9,40% e $R^2 = 87,72\%$ (Figura 19C). Por sua vez, a variação entre as Li apresentou maior amplitude, embora em valores absolutos foram menores, variando de 2,8 (T0) a 3,7 mmol m⁻²s⁻¹ (NPK), ou seja, 24,30% de variação.

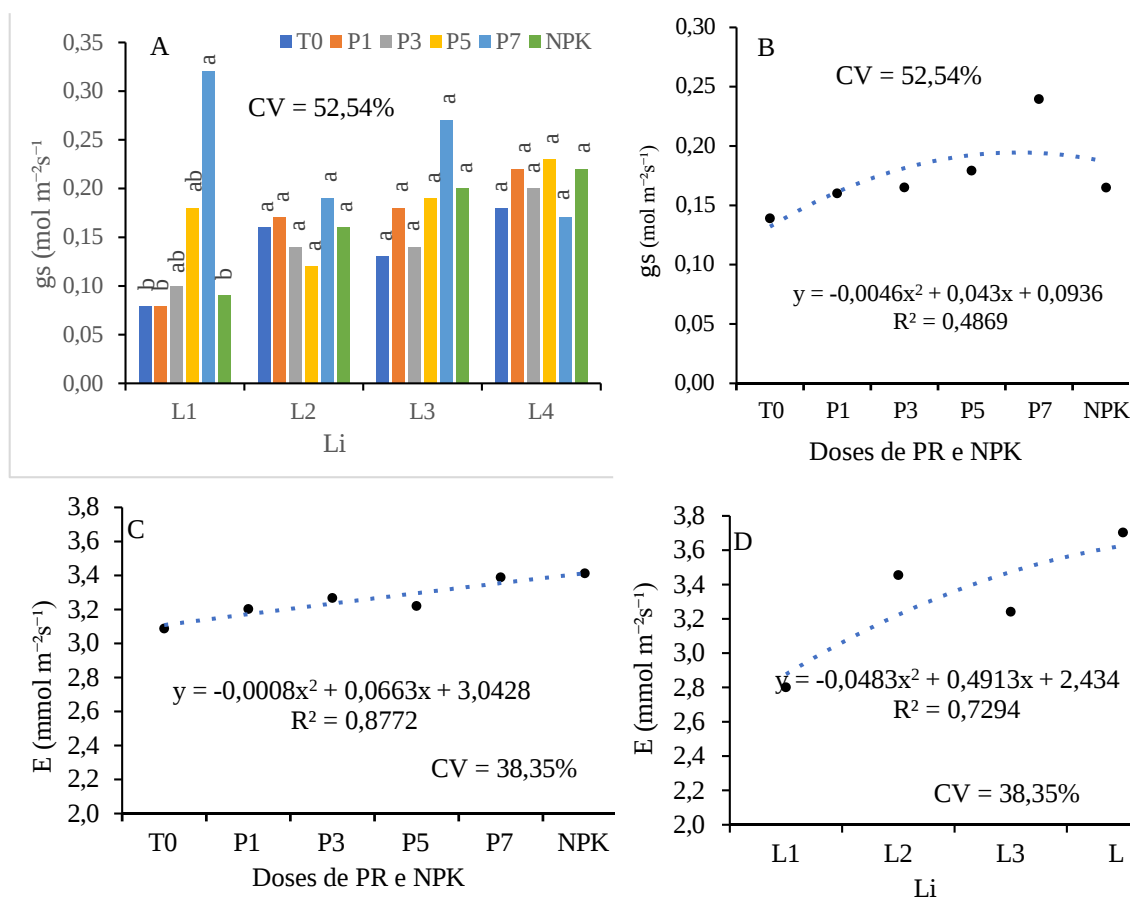


Figura 18. Níveis de gs e E em função das doses de PR e NPK para cada Li.

Médias seguidas de letras minúsculas entre diferentes doses de PR e NPK para uma mesma lâmina de irrigação não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A correlação entre gs e E geralmente é positiva, uma vez que a abertura dos estômatos, que permite a entrada de CO_2 para a fotossíntese, também facilita a saída de vapor d'água, aumentando a taxa de transpiração. No entanto, essa relação pode ser modulada por diversos fatores ambientais e internos à planta, como disponibilidade hídrica, condições de luminosidade e a própria capacidade da planta de regular a abertura estomática (Taiz *et al.*, 2017).

A aplicação de diferentes Li pode impactar diretamente a gs , pois regula a disponibilidade hídrica e a pressão de água nas folhas, influenciando a abertura dos estômatos. Em condições de déficit hídrico, as plantas tendem a reduzir a abertura estomática para minimizar a perda de água pela E , o que, no entanto, pode limitar a entrada de CO_2 e reduzir a fotossíntese (Chaves *et al.*, 2009).

Espera-se uma correlação positiva entre a disponibilidade de água no solo e a gs , uma vez que o aumento do suprimento hídrico permite uma abertura estomática mais prolongada e efetiva. Este efeito é descrito por Campos *et al.* (2021), que observaram que

plantas submetidas a Li otimizadas apresentaram uma gs superior em comparação com aquelas submetidas a menor disponibilidade hídrica, este efeito não foi verificado no experimento (Figura 19A), o que demonstra que o estudo deste parâmetro deve ser verificado com mais detalhamento em novos experimentos.

As doses de PR e NPK pode exercer efeitos diferentes na gs e, por extensão, na A e na E, sendo o que o NPK fornece nutrientes facilmente disponíveis, resultando em um aumento rápido no crescimento e na demanda por água e, portanto, na gs. De acordo com Santos *et al.* (2018) o NPK tende a melhorar a eficiência fotossintética e a gs devido à disponibilidade imediata de nitrogênio, fósforo e potássio, elementos essenciais para processos bioquímicos no mesófilo foliar e na manutenção da abertura estomática, porém isto não ocorreu nas condições do experimento, o que leva a necessidade de novas abordagens em campo para entender qual seria a dose ótima para esse cultivo.

O PR é uma fonte de nutrientes de liberação gradual e depende da solubilização no solo para que os minerais se tornem disponíveis. O uso de PR em solos ácidos aumenta a gs de maneira progressiva e sustentada, mas não tão intensamente quanto o NPK. Essa adubação de liberação lenta pode beneficiar culturas em sistemas de baixo insumo, mantendo uma gs estável sem provocar aumentos excessivos na A, o que é vantajoso em condições de menor disponibilidade hídrica. Por exemplo, Couto (2011) observou que, embora o NPK tenha sido mais eficiente que o PR em aumentar a gs e a fotossíntese líquida no feijoeiro, o PR proporcionou uma liberação gradual de nutrientes, adequada para sistemas de manejo com menor aporte de insumos. Pode-se verificar no experimento esta condição, tanto para maiores doses de PR, sendo P7 inclusive superior ao NPK, porém apenas uma tendência (Figura 19B).

A combinação entre Li e o tipo de adubação interfere na gs de forma complexa. Quando a adubação NPK é aplicada juntamente com Li adequadas, a planta tende a apresentar maior gs e A, especialmente em culturas de crescimento rápido e alta demanda hídrica. Em contrapartida, a combinação de PR com uma Li mais baixa pode ser vantajosa em sistemas sustentáveis, pois pode promover uma abertura estomática moderada, evitando excessiva transpiração e mantendo a eficiência no uso de água e nutrientes, o que, de alguma forma ocorreu no experimento, uma vez que E manteve-se com pouca variação mesmo em condições de baixa Li e doses de PR (Figura 19C).

Esse comportamento é ressaltado por Catuchi *et al.* (2012), que observaram em experimentos com soja que a gs foi maior nas plantas adubadas com NPK e irrigadas a 100% da ETc., em comparação com aquelas adubadas com PR, especialmente sob

restrição hídrica. Esses autores observaram que a suplementação com potássio promoveu melhor eficiência dos parâmetros fisiológicos, incluindo a g_s , em condições sem deficiência hídrica. Em contraste, a adubação com PR, caracterizada por uma liberação mais lenta de nutrientes, pode não proporcionar o mesmo incremento imediato na g_s , especialmente sob condições de restrição hídrica (Figura 19A).

A E_iC no T0, a Li de L1 foi menor em relação a L4, e na dose de P7, a L1 foi menor às demais (Figura 20A). Em função da Li , a E_iC variou de 4,12 (T0) a 5,66 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)/(mmol $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em NPK, embora houve apenas tendência de elevação, variou 27,21% e $R^2 = 100\%$ para um polinômio de terceiro grau (Figura 20B). Por sua vez, a variação entre as doses de PR apresentou menor amplitude, variando de 5,03 (T0) a 5,82 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)/(mmol $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (P3), ou seja, 13,57% de variação entre o maior e menor valor de EUA.

A não existência de variação significativa da EUA pode indicar que as plantas podem não ter sofrido estresse hídrico severo, já que no período do experimento houve precipitações natural (Figura 20B) ou ainda pela capacidade de resposta do cultivar, sendo capaz de amenizar tais estresses.

A eficiência da carboxilação é um processo crítico na fotossíntese das plantas C4. A relação A/C_i pode variar dependendo das condições ambientais, incluindo a disponibilidade de água e nutrientes (Farquhar *et al.*, (1980). A disponibilidade hídrica pode afetar significativamente a E_iC , especialmente em condições de déficit hídrico, onde a redução na condutância estomática pode limitar a entrada de CO_2 e, consequentemente, a taxa de fotossíntese (Medrano *et al.*, 2002). Segundo Flexas *et al.* (2006), a eficiência fotossintética pode ser mais sensível a variações na disponibilidade hídrica do que a variações nutricionais, especialmente em ambientes controlados.

A EUA pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a capacidade da planta de gerenciar a transpiração em resposta às condições ambientais. De acordo com Jones (1998), a EUA pode ser altamente dependente da capacidade da planta de regular a abertura estomática em resposta às condições ambientais, incluindo a disponibilidade de água. Quando a transpiração é controlada de forma eficiente, as plantas podem manter uma fotossíntese elevada com menor consumo de água, resultando em maior EUA.

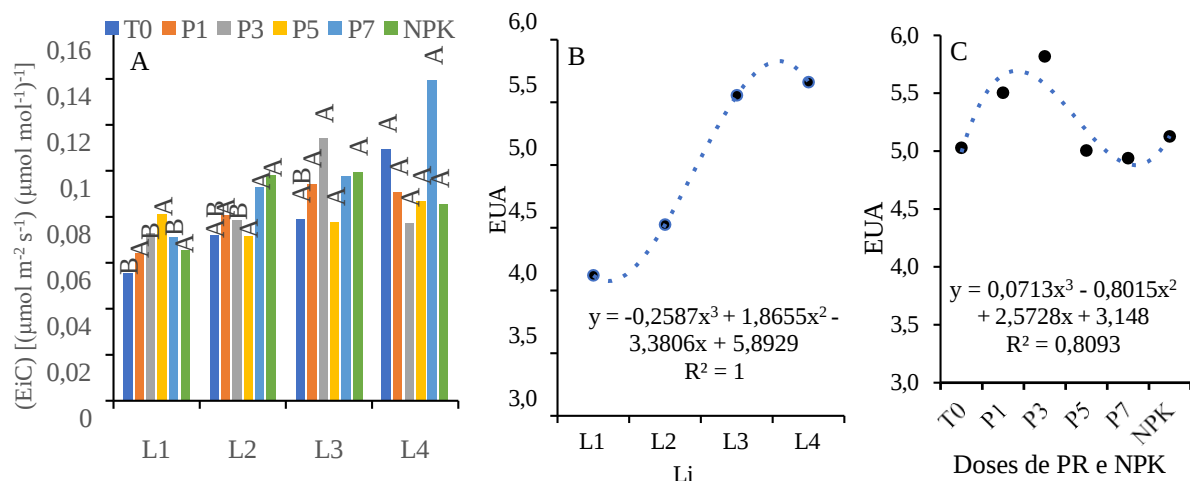


Figura 19. Eficiência instantânea da carboxilação (EiC) [(μmol m⁻² s⁻¹) (μmol mol⁻¹)⁻¹] e eficiência no uso de água (EUA) (μmol m⁻² s⁻¹)/(mmol H₂O m⁻² s⁻¹) para as dosagens de PR e Li.

Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre diferentes lâminas de irrigação dentro de cada dose de PR e NPK não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De acordo com Flexas *et al.* (2006), em condições de estresse hídrico, a redução na transpiração pode levar a um aumento na EUA, pois as plantas tentam conservar água enquanto mantêm a atividade fotossintética. No entanto, isso também pode limitar a assimilação de CO₂, dependendo da gravidade do estresse.

É importante destacar que a relação entre o Ci e a EUA é fundamental em estudos de fisiologia vegetal. Plantas que conseguem manter uma baixa concentração de carbono interno com uma alta taxa de fotossíntese geralmente têm uma alta eficiência no uso da água (Medrano, 2002; Long, 2004).

Lobo (2021) avaliou quatro cultivares de soja sob diferentes regimes hídricos e observou que, sob déficit hídrico, houve redução na A, gs e E, resultando em diminuição da EiC e estabilidade na EUA. Esses resultados indicam que o estresse hídrico afeta negativamente a capacidade fotossintética e a EUA em cultivares de soja, embora no experimento citado duas não apresentaram efeitos do déficit hídrico com o mesmo impacto, sendo inclusive indicadas para condições ambientais de maior calor e menor pluviosidade.

Essas tendências verificadas ao longo do experimento, que correlacionaram positivamente a variável gs, E e EUA demonstram a necessidade de mais estudos com o PR e Li, para delimitar uma dose onde exista interferência nos benefícios em relação ao estresse hídrico no cultivo da soja e se haverá alguma correspondência com a Li utilizada.

5.3 Características químicas do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja

5.3.1 Feijoeiro

A Tabela 4 apresenta a análise de variância dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m no final do ciclo de cultivo do feijoeiro. Não houve variação significativa para o pH, que foi um resultado divergente ao encontrado por Brito *et al.* (2019), que destacaram o potencial do PR para neutralizar a acidez do solo, contribuindo para a melhoria das condições para as culturas.

Tabela 4. Análise de variância dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m no final do ciclo de cultivo do feijoeiro.

Fator de variação	GL	pH	Ca	Mg	Ca + Mg	Al	H + Al
Valores de Quadrados Médios							
PR	5	089 ^{ns}	2,524**	0,781 ^{ns}	1,215 ^{ns}	0,723 ^{ns}	1,032 ^{ns}
Li	3	004 ^{ns}	2,645**	4,043*	1,457 ^{ns}	1,869 ^{ns}	1,992*
PRxLi	15	056 ^{ns}	0,574 ^{ns}	0,721*	0,840 ^{ns}	0,748 ^{ns}	0,430*
CV (%)		3,01	23,02	75,62	26,79	580,17	44,02
Fator de variação	GL	CTC	P	MO	Sat.Al	SB	K
PR	5	54***	1286,743**	0,56 ^{ns}	0,72 ^{ns}	422,980*	669,48 ^{ns}
Li	3	,024*	101,547 ^{ns}	0,88 ^{ns}	1,869 ^{ns}	51,904 ^{ns}	2261,96 ^{ns}
PRxLi	15	,734*	46,573*	0,314*	0,748 ^{ns}	88,853 ^{ns}	1652,85 ^{ns}
CV (%)		4,44	4,0	39,84	580,17	14,25	28,46

Valor dos Quadrados Médios para análise de Variância do Feijoeiro.

SB: Saturação de Bases; Sat.Al: Saturação por alumínio; GL: graus de liberdade; ***: P<0,001;

**:P<0,01; *: P<0,05; ns: Não significativo.

O Ca apresentou variação significativa dentro das doses de PR e Li, provavelmente devido a liberação promovida pelo remineralizador. Esse resultado é concordante com o estudo de Carvalho *et al.* (2021), que observaram que o PR aumenta a disponibilidade de Ca em solos ácidos, melhorando a qualidade química do solo para o crescimento das plantas. O Mg apresentou diferença significativa entre as Li bem como interação com o PR, por sua vez, Ribeiro *et al.* (2020), relatam que o efeito do PR sobre o teor de Mg é dependente das condições do solo e das doses aplicadas (Tabela 4).

A soma de Ca + Mg e Al (no início do experimento era inferior a 0,1 cmol_c dm⁻³) e não apresentou interação entre PR e Li ou isoladamente (Tabela 4). Esses resultados reforçam a importância do manejo hídrico adequado para maximizar a eficiência do PR, conforme destacado por Brito *et al.* (2019), que observam que a irrigação pode favorecer a liberação de minerais presentes no PR. Carvalho *et al.* (2021) observaram que o PR

pode reduzir a toxicidade do alumínio em solos ácidos, o que é benéfico para o desenvolvimento das culturas, embora esse comportamento não tenha sido verificado neste estudo.

A Al e SatAl não apresentaram alterações em função das doses de PR e Li, provavelmente devido ao fato de já ser baixo no início do experimento (Tabela 4). Silva *et al.* (2022), indicaram que a aplicação de remineralizadores pode reduzir a Sat.Al em solos ácidos, melhorando a qualidade do solo para as culturas. Por sua vez, o teor de H + Al apresentou variação entre da média das doses de PR e NPK dentro das Li, bem como na interação das doses de PR e Li.

Houve elevação da CTC quando da aplicação de PR e uso de NPK (Tabela 4), sugerindo que as adubações contribuíram para uma melhoria na retenção de cátions essenciais, o que é positivo para a fertilidade do solo. Assim, ocorreu a interação entre a Li e PR, podendo resultar em maior eficiência na utilização dos nutrientes no solo, assim como verificado por Silva *et al.* (2022), que demonstraram que o manejo hídrico pode otimizar a capacidade de troca catiônica, resultando em uma maior disponibilidade de nutrientes às plantas.

O P apresentou interação entre PR e NPK e as Li (Tabela 4), bem como da média das quatro Li dentro de cada dose de PR (Tabela 4). A combinação de doses mais altas de PR com Li intermediárias resultou em maiores concentrações de P no solo, o que é essencial para a fotossíntese e o crescimento das plantas. Esse efeito pode ter sido promovido pelo fato destas lâminas intermediárias não terem lixiviado o mineral, que pode ter ocorrido nas maiores lâminas, deste modo, mantendo o mineral retido proporcionalmente à dose aplicada. O PR, ao liberar P gradualmente, contribui para um fornecimento constante desse nutriente ao longo do ciclo das culturas, enquanto a irrigação otimiza a solubilização do P e sua absorção pelas raízes das plantas. A sinergia entre o PR e a irrigação é fundamental para garantir o fornecimento adequado de P, como destacado por Alovisei *et al.* (2021), que observaram que o PR pode ser uma fonte importante de P quando combinado com manejos hídricos adequados.

Em relação à MO, houve interação entre as doses de PR e as Li (Tabela 4). O aumento da MO no solo é importante para a retenção de nutrientes no solo, pois serve como um reservatório de cátions e melhora a estrutura do solo. Carvalho *et al.* (2021) ressaltam a importância da MO para a fertilidade do solo, destacando sua capacidade de reter nutrientes e melhorar as condições de crescimento das plantas.

A SB apresentou efeito significativo para as doses de PR isoladamente e sua interação com as Li. Alovizi *et al.* (2017) observaram que a adição de pó de basalto elevou os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), resultando em um aumento significativo na SB. Da mesma forma, Ramos *et al.* (2014) relataram incrementos no pH CTC e disponibilidades de nutrientes com o uso de PR, indicando melhorias nas condições químicas do solo para o crescimento das plantas. Além disso, estudos como o de Toscani e Campos (2017) verificaram que a aplicação de fosforito, basalto e dolomito fosfatado em Latossolo Vermelho distrófico resultou em aumento do pH e da SB após um ano de sua aplicação.

A aplicação de PR, especialmente nas doses mais altas (5 e 7 t ha⁻¹), combinada com Li em torno de 80% da ETc, demonstrou ser uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade química de alguns atributos químicos do solo no Cerrado. Ao mesmo tempo, a interação entre o PR e a irrigação pode favorecer a disponibilização de nutrientes, reduzir a acidez e melhorar a fertilidade do solo, dando maior garantia de sustentabilidade e elevação da produtividade das culturas no Cerrado, como enfatizado por Ribeiro *et al.* (2020).

5.3.2 Soja

A Tabela 5 apresenta a análise de variância dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m ao final do ciclo de cultivo da soja. Embora não tenha ocorrido alteração significativa nos valores de pH em função das doses de PR e Li (Tabela 4), a exemplo do que ocorreu com no final do cultivo de feijoeiro, Carvalho *et al.* (2021) relatam que a aplicação de PR pode elevar o pH em solos ácidos, especialmente quando combinado com práticas de manejo adequadas, como o controle da irrigação.

Houve diferença significativa do teor de Ca apenas considerando a médias das doses de PR dentro das Li (Tabela 4), sendo mais evidente para 100 e 120% da ETc, corroborando com Silva *et al.* (2022), que destacam o papel crucial da irrigação na liberação de cátions no solo.

O Mg, soma de Ca + Mg, Al, P, MO, Sat. Al e K não apresentaram diferença significativa em função das doses de PR e Li (Tabela 5). Ribeiro *et al.* (2020), observaram diferenças significativas no teor de Mg quando do uso de doses adequadas de PR, especialmente em solos ácidos. No caso do Al, o teor já era baixo no início do experimento, porém, Silva *et al.* (2022), indicam que a aplicação de PR tem um efeito positivo na redução da toxicidade do alumínio em solos ácidos. Já o P não variou pela

liberação gradual ao solo, como relatado por Brito *et al.* (2019), que sugerem que o PR contribui para a melhoria da disponibilidade de P a longo prazo. Nóbrega *et al.* (2016) também não verificaram diferenças nos teores de MO associados a diferentes Li. A ausência de variação da SB no ciclo da soja pode ser decorrente de uma maior estabilidade das bases após um ano.

Tabela 5. Análise de variância dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m no final do ciclo de cultivo da soja.

Fator de variação	GL	Quadrados médios					
		pH	Ca	Mg	Ca + Mg	Al	H + Al
PR	5	0,165 ^{ns}	1,430 ^{ns}	0,392 ^{ns}	1,601 ^{ns}	0,723 ^{ns}	0,520 ^{ns}
Li	3	0,148 ^{ns}	11,135 ^{***}	0,160 ^{ns}	14,610 ^{ns}	1,868 ^{ns}	0,288 ^{ns}
PR x Li	15	0,430 ^{ns}	0,468 ^{ns}	0,257 ^{ns}	0,579 ^{ns}	0,745 ^{ns}	0,287 [*]
CV (%)		86,10	28,85	75,62	24,82	580,17	49,22
Fator de variação	GL	CTC	P	MO	Sat.Al	SB	K
PR	5	0,720 ^{ns}	269,403 ^{ns}	0,390 ^{ns}	0,860 ^{ns}	121,820 ^{ns}	0,418 ^{ns}
Li	3	17,085 ^{***}	101,547 ^{ns}	0,260 ^{ns}	0,557 ^{ns}	251,383 ^{ns}	0,331 ^{ns}
PRxLi	15	0,670 ^{ns}	46,573 ^{ns}	0,284 [*]	0,661 ^{ns}	91,972 ^{ns}	0,352 ^{ns}
CV (%)		20,65	86,10	48,89	412,31	13,37	135,21

SB: Saturação de Bases; Sat.Al: Saturação por alumínio; GL: graus de liberdade; ***: $p < 0,001$; **: $p < 0,01$; *: $p < 0,05$; ns: Não significativo.

A CTC teve variação apenas entre as Li, onde, embora o PR e NPK possam melhorar a CTC em solos com baixa fertilidade, não foi constatada variação devido à saturação de bases existente no solo (Tabela 5). A CTC é uma propriedade intrínseca do solo, influenciada principalmente pela sua composição mineralógica e teor de MO.

5.4 Análise conjunta das características químicas do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja

- pH

No final do ciclo do feijoeiro não houve diferença significativa para o pH. Embora não ficou evidente, o PR pode atuar na neutralização da acidez do solo, devido à presença de minerais como o Ca e Mg, que são liberados durante o intemperismo da rocha (Bertoldo *et al.*, 2015). Já em função da Li no feijoeiro foi praticamente contínuo.

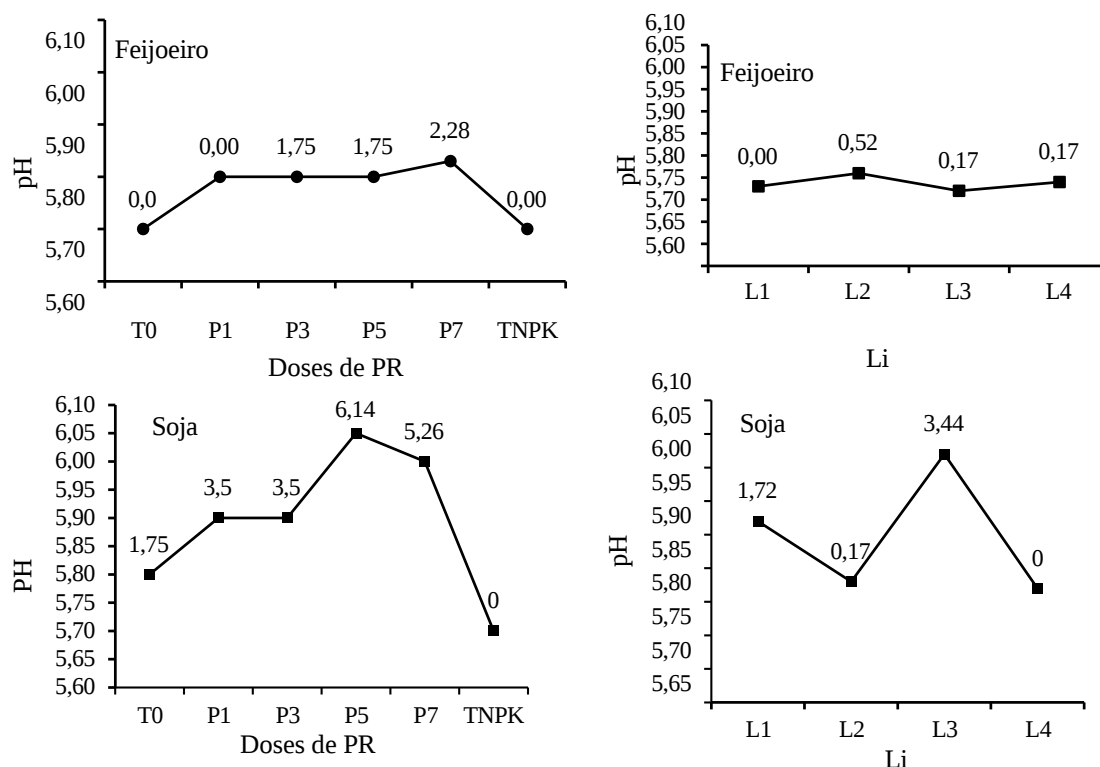


Figura 20. Valores médios de pH do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.

No solo do final do ciclo da soja, houve uma maior amplitude no valor de pH, onde em valor numérico ocorreu uma resposta mais acentuada ao PR em comparação com o feijoeiro, especialmente nas doses de PR de P5 e P7, mesmo assim, com variação de apenas 6,14% em relação ao T0, mas no NPK foi igual a T0. Esses resultados corroboram, em parte, com Melamed (2007), que destacam o papel do PR na correção da acidez do solo e na disponibilização gradual de nutrientes essenciais para as plantas.

De acordo com o trabalho de Theodoro *et al.* (2006), o PR tem a capacidade de fornecer nutrientes essenciais ao solo de forma eficiente e sustentável, promovendo um aumento no pH e melhorando a disponibilidade de nutrientes para as culturas. Isso reflete a ideia de que o manejo adequado da irrigação pode melhorar os benefícios do PR, otimizando a liberação gradual de nutrientes, o que é fundamental para a sustentabilidade agrícola, especialmente em solos ácidos como os encontrados no bioma Cerrado (Almeida Júnior *et al.*, 2022). É importante destacar que a irrigação adequada não apenas ajuda na disponibilização de nutrientes, mas também favorece a atividade microbiana no solo, que é essencial para a melhoria da qualidade do solo (Kunz *et al.*, 2022). O controle da irrigação, especialmente durante os períodos críticos de desenvolvimento das culturas, pode maximizar a eficiência do uso de fertilizantes, como o PR, além de evitar a lixiviação de nutrientes, que pode ter ocorrido nas quatro Li.

Estudo de Elias (2023) com Li de 50 %, 75 %, 100% e 125% da ETc e doses de PR de 6, 8, 10 e 12 t ha⁻¹, encontrou um aumento do pH do solo associado a lâmina que corresponde a 100% da ETc, para o cultivo da alface, o que não foi verificado neste experimento.

A elevação do pH do solo quando do uso de PR, mesmo que em valor numérico, está diretamente relacionada à disponibilidade de Ca, um dos principais cátions que contribui para a neutralização da acidez. À medida que o pH do solo aumenta, há uma melhoria nas condições para a absorção de cálcio pelas plantas, elemento essencial para a estruturação do solo e o desenvolvimento das raízes.

- Cálcio (Ca)

Em relação ao feijoeiro, o teor de Ca atingiu valores menores em comparação à soja, o que pode ser explicado pelo maior acúmulo de Ca provido pelo PR no segundo ano. A variação mais elevada em termos percentuais em função das doses de PR ocorreu em P5 com 40,74% de aumento em relação a T0 e já em função da Li, L1 foi maior que em relação a L4 (60%) a ETc em 40,47%. Observa-se que o teor de Ca no final do ciclo do feijoeiro, P5 foi superior a T0 e P1, já a L1 foi superior a L3 e L4, mostrando que maiores Li favorecem a disponibilização de Ca (Figura 22).

O PR é capaz de liberar cálcio de forma gradual e sustentada. É importante ressaltar que o NPK não possui Ca em sua formulação, sendo assim, fica evidente que existe um desprendimento de Ca em PR. Assim, o PR pode contribuir para a melhoria contínua da fertilidade do solo, promovendo benefícios a longo prazo para as culturas, como maior resistência ao estresse hídrico e melhor aproveitamento dos nutrientes disponíveis no solo.

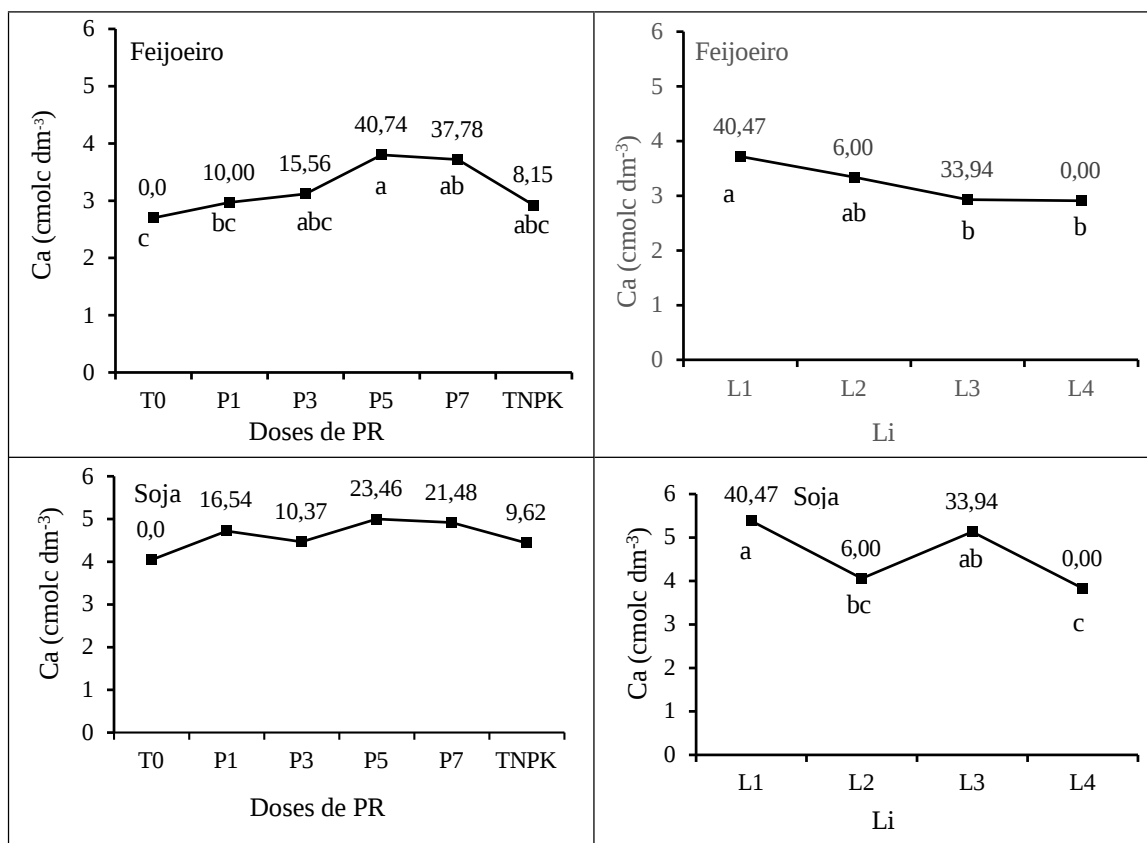


Figura 21. Valores médios de Ca do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes Li para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma Li não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No final do ciclo da soja, considerando a média das Li dentro de cada dose de PR, não houve variação, por sua vez as Li de L1 e L3 foram maiores a L4, porém, tanto em função das doses de PR e Li no final do ciclo da soja os teores de Ca foram maiores que no final do ciclo do feijoeiro (Figura 22).

- Magnésio (Mg)

O equilíbrio do Ca é essencial para o desenvolvimento das culturas e para a manutenção da fertilidade do solo. No entanto, para garantir uma nutrição completa das plantas, é igualmente fundamental avaliar o Mg, um nutriente que atua diretamente em processos biológicos, como a fotossíntese e a formação de proteínas. O magnésio não apenas contribui para a estrutura das clorofilas, mas também é necessário para a ativação de enzimas envolvidas no metabolismo energético.

Os valores de Mg foram, em média, menores no final do ciclo feijoeiro em relação ao da soja, especialmente em L4, onde foram encontrados valores de 0,6 mg dm⁻³ em T0

e 0,9 mg dm⁻³ em P3, enquanto na soja na mesma Li os teores em L1 foram de 1,4 mg dm⁻³ e 1,54 mg dm⁻³ em L4, nesse caso considerando a média das doses de PR dentro destas Li, representando um aumento de mais de 100% no segundo ano. Porém, na L1 o teor de Mg chegou a 2,80 mg dm⁻³ em T0, muito superior que na L4, também em T0 (Figura 23). Esse aumento no teor de Mg na Li mais restritiva pode demonstrar uma reação a longo prazo de PR, que contém teores de Mg em sua constituição.

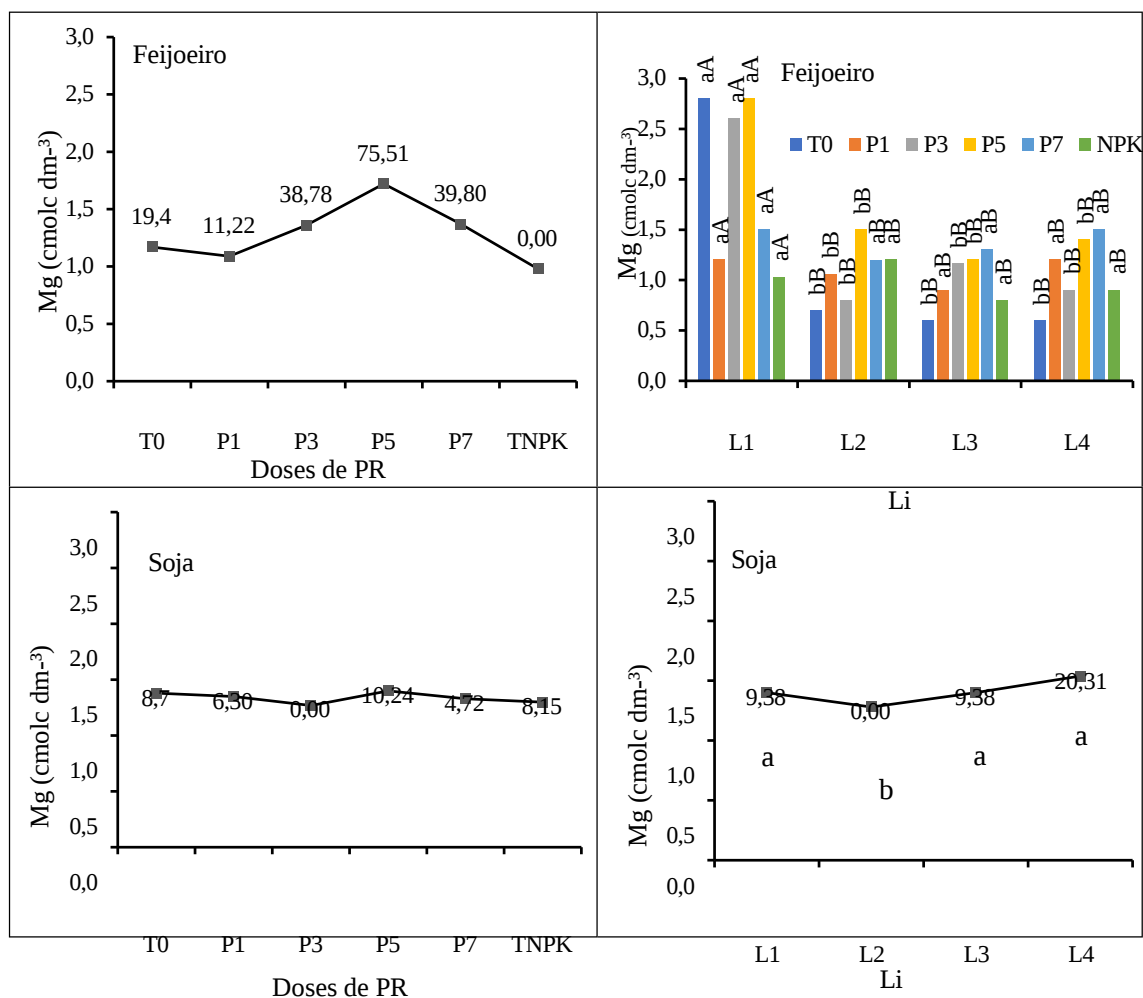


Figura 22. Valores médios de Mg do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes Li para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma Li não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Ainda para o feijoeiro, L1 mostrou um aumento nas concentrações de Mg com o uso das doses de PR, principalmente para a dose de 5 t ha⁻¹ (P5), que atingiu 2,8 mg dm⁻³, superior ao de NPK (1,03 mg dm⁻³). Este resultado reforça o efeito positivo da aplicação de PR na liberação de magnésio para as culturas, destacando seu papel na fertilização de solos, conforme observado por diversos autores, como Silva *et al.* (2019), que indicam os benefícios do uso de PR para a correção e melhora da fertilidade do solo.

No final do ciclo da soja, observou-se bastante estabilidade nos valores entre L1 a L3. Pode-se inferir que a combinação entre as Li e o uso de PR tem um impacto positivo na disponibilidade de Mg no solo, especialmente quando comparado com o uso exclusivo do fertilizante tradicional (NPK) (Figura 23). Esse efeito foi particularmente notável para o primeiro ano de experimento em L1, o que sugere que o PR pode ser uma alternativa eficaz para melhorar a fertilidade do solo, principalmente em solos ácidos do bioma Cerrado, que, de acordo com Menezes *et al.* (2021), frequentemente apresentam deficiência em diversos nutrientes essenciais, como o Mg.

A análise simultânea do Ca e Mg permite uma compreensão mais profunda da interação desses nutrientes no solo, considerando que ambos são cátions essenciais para a fertilidade e saúde do solo. O Ca, por sua vez, atua na floculação das partículas do solo, melhorando sua estrutura e facilitando a circulação de água e aeração, enquanto o Mg é vital para a fotossíntese e outras reações metabólicas nas plantas. A presença equilibrada desses dois nutrientes é determinante para a otimização da utilização de outros elementos essenciais, como o P e K, contribuindo para um desenvolvimento mais robusto das culturas.

- Soma das concentrações de cálcio e magnésio ($\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2$)

Os teores de $\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2$ foram maiores, em valor numérico, seja em função das doses de PR e Li, no final do ciclo da soja em relação ao ciclo do feijoeiro, onde o maior valor foi de $3,48 \text{ mg dm}^{-3}$ em P3 no final do ciclo do feijoeiro, chegando a $6,84 \text{ mg dm}^{-3}$ na Li no final do ciclo da soja. Esses resultados sugerem que tanto o PR quanto o NPK influenciam positivamente a concentração de $\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2$ no solo, sendo que a resposta pode ser dependente das Li, da concentração da adubação e do tipo de cultura. A soja apresentou uma resposta mais marcante em Li em comparação com o feijoeiro (Figura 24).

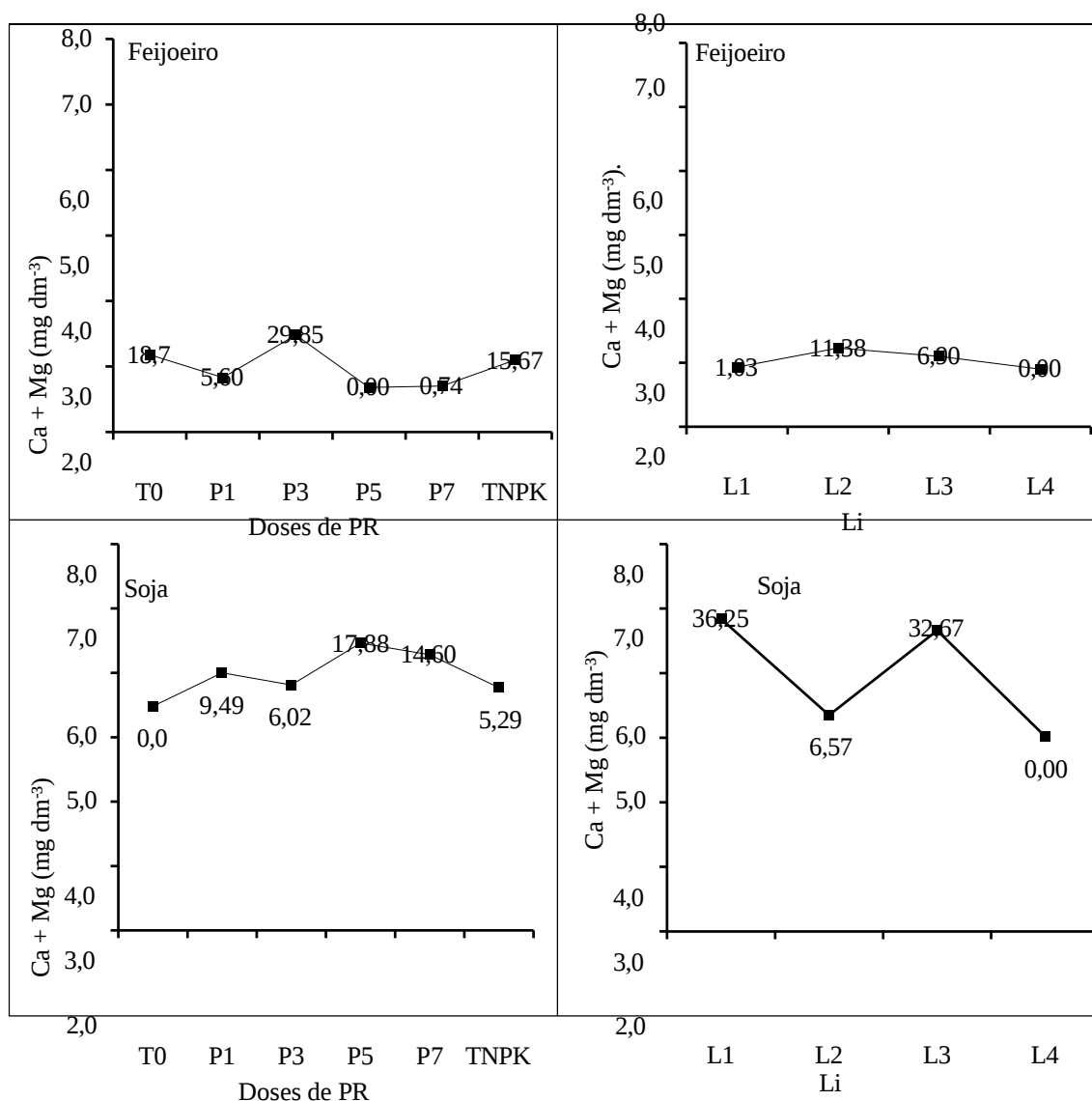


Figura 23. Valores médios de Ca + Mg do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro (A e B) e da soja (C e D) e variação percentual considerando o menor valor como referência.

O uso do PR, tem um efeito positivo na disponibilidade de Ca e Mg no solo, especialmente quando comparado aos fertilizantes tradicionais, como o NPK, que não possuem tais nutrientes em sua formulação. De acordo com Raij (2012), a aplicação de remineralizadores pode promover a liberação de nutrientes de maneira gradual, o que aumenta a eficiência do uso desses elementos pelas plantas. No contexto de práticas agrícolas sustentáveis, como demonstrado por Gillman *et al.* (2012), a utilização de materiais alternativos para fertilização, como o PR, pode reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos e melhorar a qualidade do solo a longo prazo.

A irrigação, conforme os dados apresentados, também se mostra como um fator influente na concentração de $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ no solo. Em Li maiores, como a L1 (soja) e L2 (feijão), os tratamentos com PR favoreceram na liberação desses nutrientes. Isso ocorre porque a irrigação facilita a mobilização e a solubilização dos cátions no solo, promovendo um maior aproveitamento dos nutrientes presentes (Manning, 2012).

A interação entre irrigação e fertilização é essencial para maximizar os benefícios do uso de PR e NPK. A pesquisa de Manning (2012) indica que a rotação pode ser especialmente útil em solos com pH baixo, como os solos tropicais, que são comuns no Brasil. Nesse tipo de solo, o PR tem um efeito positivo na liberação de nutrientes, como Ca e Mg, enquanto o NPK pode ser suficiente em solos mais equilibrados e com boas condições de retenção de água e nutrientes.

Em termos de eficiência, a combinação de PR com Li teve um impacto positivo na resposta da soja, corroborando estudos de Gillman *et al.* (2012), que afirmam que o PR é uma alternativa eficaz para a melhoria da fertilidade do solo e do crescimento das culturas. Esse efeito positivo do PR foi menos pronunciado para o feijoeiro, o que pode ser explicado pelas diferentes necessidades nutricionais e respostas das culturas aos nutrientes disponíveis no solo.

- Alumínio (Al)

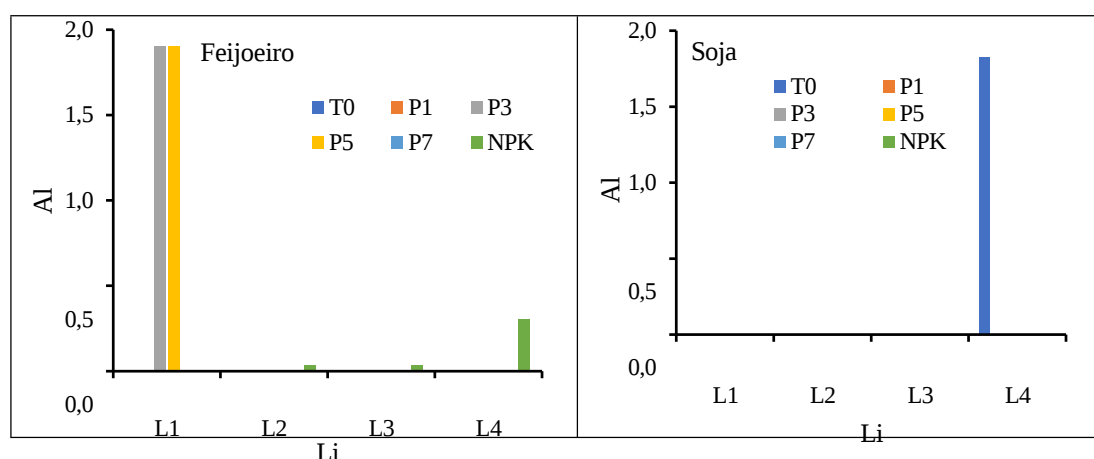


Figura 24. Análise do Al do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja considerando a média das doses de PR e NPK dentro de cada Li.

Houve casos isolados que apontaram a presença de Al em algumas repetições, provavelmente devido ao solo não ser completamente uniforme e não ter sido previamente corrigido, com CV altíssimo ($CV = 580,17$), onde a maioria dos tratamentos apresentou teores igual a zero. Em L1 o teor foi de $1,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no ciclo do feijoeiro e $1,83 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em L4 no solo do final do ciclo da soja. De acordo com Marschner (1995) a concentração de $1,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ é considerada tóxica para as plantas cultivadas, enquanto $0,03 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ seria considerado um nível moderado deste mineral nos solos.

A irrigação na soja, especialmente nas lâminas L1, L2 e L3, parece ter tido um efeito positivo no comportamento do alumínio no solo. Ao aumentar a quantidade de água disponível para as plantas, a irrigação pode ter promovido o deslocamento do alumínio para camadas mais profundas do solo, reduzindo a sua concentração nas camadas superficiais. Esse efeito é particularmente importante para as culturas de soja e feijoeiro, que são altamente sensíveis à toxicidade do Al. A diluição do alumínio no solo pode permitir que as plantas tenham um desenvolvimento mais robusto, sem a limitação que esse elemento tóxico normalmente impõe ao crescimento radicular.

Ao observar o efeito combinado da irrigação e da fertilização, fica claro que esses dois fatores podem ter um impacto importante na qualidade do solo e na disponibilidade de nutrientes para as plantas. A irrigação, ao reduzir a concentração de Al nas Li de solo mais profundas, contribuiu para a melhoria do ambiente radicular. Já os fertilizantes, especialmente os remineralizadores e fontes de Ca, como o PR, podem ter ajudado a promover a neutralização da acidez do solo, criando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das raízes e à absorção de outros nutrientes essenciais.

Em solos ácidos, a aplicação de corretivos de acidez, como o PR, tem mostrado bons resultados na melhoria da qualidade do solo, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde a acidez é uma característica comum. De acordo com Raij (2012), a utilização de corretivos como o PR pode promover a liberação de nutrientes essenciais às plantas, ao mesmo tempo em que reduz a toxicidade de elementos como o Al. Esse processo, quando combinado com práticas de irrigação adequadas, pode ser altamente eficaz na melhoria das condições do solo para o cultivo de soja e feijoeiro.

Neste sentido, Oliveira *et al.* (2023) afirmam que o uso de PR aumentou o pH do solo e diminuiu o alumínio trocável, fornecendo macronutrientes e contribuindo para melhorias na estrutura do solo.

Além disso, Silveira e Campos (2017) obtiveram por meio de um experimento com a aplicação de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizantes naturais em solos lixiviados (latossolos distróficos) a diminuição da saturação por alumínio, aumento do pH e da saturação por bases, indicando uma melhoria nas condições químicas do solo, quando comparado ao fertilizante químico convencional utilizado neste mesmo experimento (NPK na dose de 40, 30 e 10).

- Acidez potencial (H + Al)

Observa-se que no solo do final do ciclo do feijoeiro, o teor de acidez potencial (H+Al) foi maior na L1 nas doses de PR de P3 e P5 (Figura 26), o que pode indicar que a maior Li favoreceu a elevação de H+Al. Aarnio *et al.* (2003) afirmam que a liberação controlada de nutrientes afeta a dinâmica da acidez no solo, especialmente em solos de textura média a arenosa, similar ao solo do experimento. O aumento da acidez potencial observado na L1 do ciclo do feijoeiro pode estar associado à maior dissolução de compostos ácidos provenientes da fertilização, intensificada pela disponibilidade hídrica.

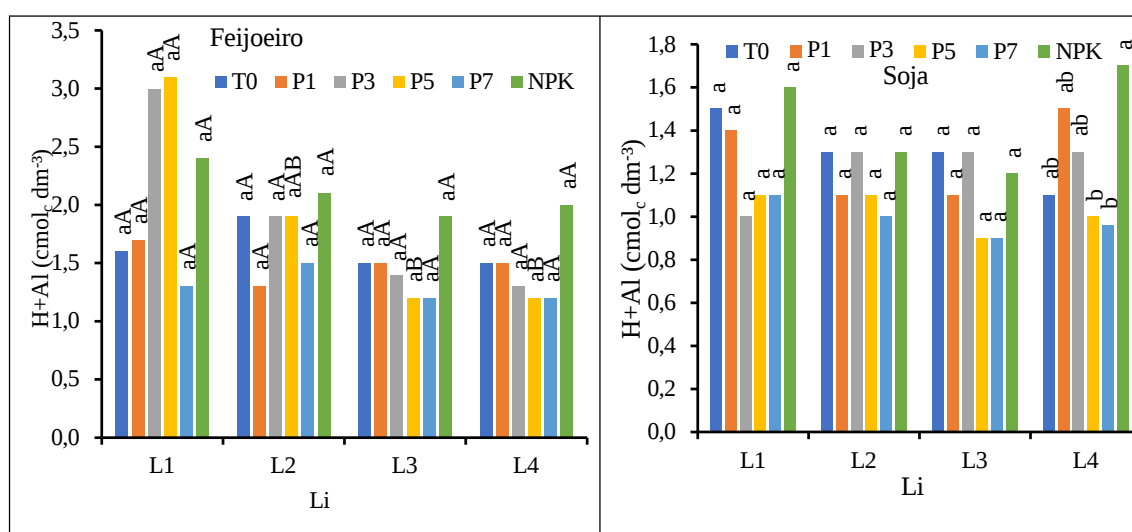


Figura 25. Análise do H + Al do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes Li para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma Li não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No caso da soja (B), houve uma variação mais expressiva em L4, onde observou-se em TNPK um valor superior nesta lâmina mais restritiva, em comparação a P5 e P7, o que pode indicar um desempenho inferior no adubo químico, que pode ter realizado uma pior solubilização na ausência de irrigação suficiente.

O aumento de H + Al em TNPK pode indicar uma maior liberação de compostos ácidos, devido a menor concentração do remineralizador e menor taxa de solubilidade e sua interação com a umidade do solo (Allen *et al.*, 1998).

Além disso, a Li pode intensificar a lixiviação de bases no solo, aumentando a acidez potencial deste solo, com observam MENDES *et al.* (2017), que afirmam que em Li mais altas, o risco de lixiviação de nutrientes e o aumento da acidez são maiores, o que pode ser prejudicial, especialmente para o feijoeiro, que é mais sensível à acidez do solo do que a soja.

- Capacidade de troca catiônica (CTC)

Observa-se que em L1, os tratamentos T0 e P1 apresentaram CTC de cerca de 6,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, muito similar à P5 e NPK que alcançaram 6,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Houve um discreto aumento em valor numérico em P7, com média de 7,20 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, mas sem qualquer variação estatística (Figura 27). A variação observada em P7, pode estar relacionado à maior disponibilidade de cátions essenciais no solo devido à aplicação em maior proporção do PR. Esse resultado está em conformidade com os estudos de Alovisei *et al.* (2020), que destacam o impacto positivo do PR na melhoria dos atributos químicos do solo e na produtividade agrícola.

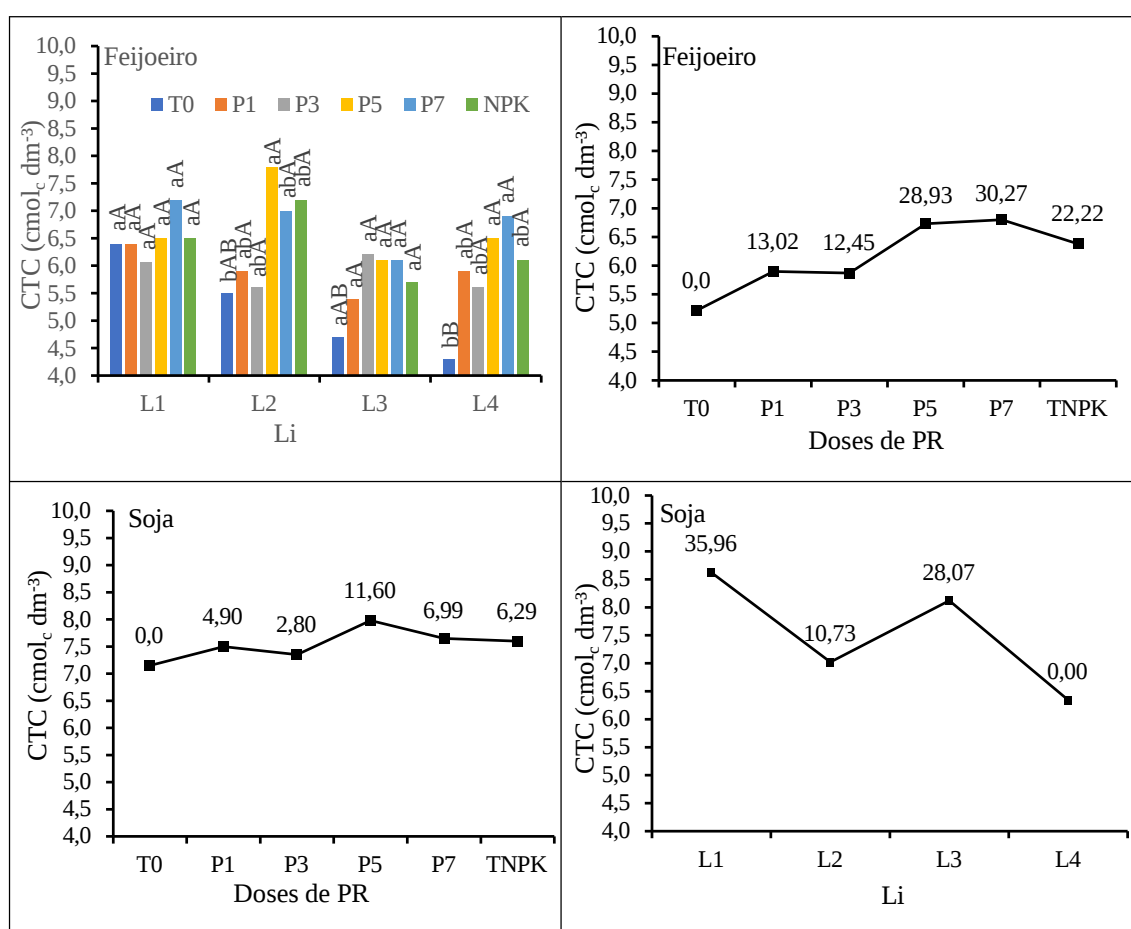


Figura 26. Valores médios de CTC do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja e variação percentual considerando o menor valor como referência.

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes Li para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma Li não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Houve variação em T0, sendo superior em L1, quando comparado a L2 e L4 para o feijoeiro, o que sugere que Li maiores tendem a promover maior valor de CTC. Esse

comportamento pode ser atribuído à influência da umidade na mobilidade dos nutrientes e na dinâmica de troca iônica no solo. Segundo Allen *et al.* (1998), a evapotranspiração e a distribuição hídrica desempenham um papel crucial na absorção de nutrientes pelas plantas, afetando diretamente a fertilidade do solo. Nóbrega *et al.* (2016) em experimento com forrageiras e milho verificaram que as lâminas de irrigação influenciaram a movimentação dos nutrientes no perfil do solo, o que pode alterar a CTC deste solo.

Em L2, a dose de PR de P5 apresentou valores superiores à T0, sugerindo que maiores doses de PR em irrigação adequada podem elevar a CTC do solo. Santos (2020) observou que o uso de PR resultou em um aumento de 10% nas cargas negativas do solo, elevando a CTC em comparação com parcelas que receberam KCl. Esse incremento foi atribuído à liberação de cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ durante o processo de dissolução do PR, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo.

Os valores de CTC para o feijoeiro foram em média mais baixos do que os observados na soja, possivelmente devido às diferenças nas exigências nutricionais de cada planta, além do fato de que a adubação do PR no segundo ano consecutivo pode ter sido mais responsiva.

A CTC no final do ciclo da soja, considerando a média dos Li dentro de cada dose de PR e NPK, e estas dentro das Li tenderam a se elevarem com aumento das doses de PR (máximo de 11,60%) e diminuir com redução da Li (máximo de 35,96%), respectivamente (Figura 27).

Esses resultados podem indicar, tal como ocorreu no feijoeiro, que Li e doses de PR maiores tendem a promover maior CTC, conforme descrito por Oliveira *et al.* (2023) que afirmam que a aplicação de PR em plantas forrageiras trouxe benefícios como o aumento da CTC e do pH do solo, além da diminuição do alumínio trocável e fornecimento de macronutrientes, contribuindo para melhorias na estrutura do solo.

O efeito das lâminas de irrigação sobre a CTC pode ser observado a partir de dois principais fatores: a movimentação da água no solo e a interação com os nutrientes. Silva *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2019) destacam que a irrigação adequada influencia diretamente o conteúdo de água no solo, afetando tanto a dissolução de nutrientes quanto a movimentação desses elementos na matriz do solo. As Li mais elevadas podem aumentar a movimentação de cátions solúveis, como CA, Mg e K, e de elementos micronutrientes, o que pode promover um aumento na CTC.

Contudo, Ruser *et al.* (2006) e Samad *et al.* (2016) apontam que o excesso de água também pode afetar negativamente a estrutura do solo, causando compactação ou redução

na aeração, o que interfere na capacidade do solo de reter cátions. Dessa forma, a Li deve ser ajustada de maneira a equilibrar a necessidade hídrica das plantas com a manutenção da estrutura do solo, garantindo uma maior disponibilidade de nutrientes.

As doses de PR também desempenham um papel importante na modulação da CTC do solo. Segundo Santos *et al.* (2022) e Sales *et al.* (2017), o PR é uma fonte de P e outros nutrientes essenciais, e a sua aplicação em doses elevadas tende a melhorar a fertilidade do solo, particularmente em solos ácidos ou com baixa disponibilidade de P. O P, sendo um cátion divalente, interage com a CTC do solo ao ocupar os sítios de troca, o que pode levar a um aumento na capacidade do solo de reter cátions.

Além disso, o uso de PR em doses mais altas também pode promover a solubilização de outros nutrientes, como Ca e K, que são essenciais para o crescimento das plantas (Santos *et al.*, 2015; Rosa *et al.*, 2018). Esses nutrientes, ao se ligarem à superfície das partículas de solo, contribuem diretamente para o aumento da CTC, uma vez que os cátions ficam disponíveis para as raízes das plantas por períodos mais longos.

As diferenças pontuais de CTC entre os tratamentos indicam a necessidade de avaliar interações entre PR e outros insumos, como fontes de Ca e Mg, para potencializar o efeito desse atributo químico. Estudos futuros poderiam investigar combinações de remineralizadores e fertilizantes convencionais para determinar as melhores práticas de manejo em diferentes condições edafoclimáticas. Isso permitiria uma maior personalização das estratégias agrícolas, maximizando a eficiência dos insumos aplicados.

- Fósforo (P)

No final do ciclo do feijoeiro, para as quatro Li, o uso de NPK foi maior em L1 em relação a L4, ao mesmo tempo, numericamente em todas as Li este foi maior às doses de PR (Figura 28), chegando a 41 mg dm³ na L1 e de 19 mg dm³ na L4, enquanto que em L2 para a dose de PR de P3 foi de apenas 10,4 mg dm³ (Figura 28), com isso, NPK foi maior que todas as doses de PR e T0 em todas as Li, indicando que a irrigação adequada favorece a mobilização do nutriente no solo e que o NPK por estar prontamente disponível no solo tem um desempenho superior. O P é um nutriente que se movimenta de forma limitada no solo, e a irrigação desempenha um papel crucial na sua dissolução e mobilização, facilitando o acesso das raízes das plantas ao nutriente.

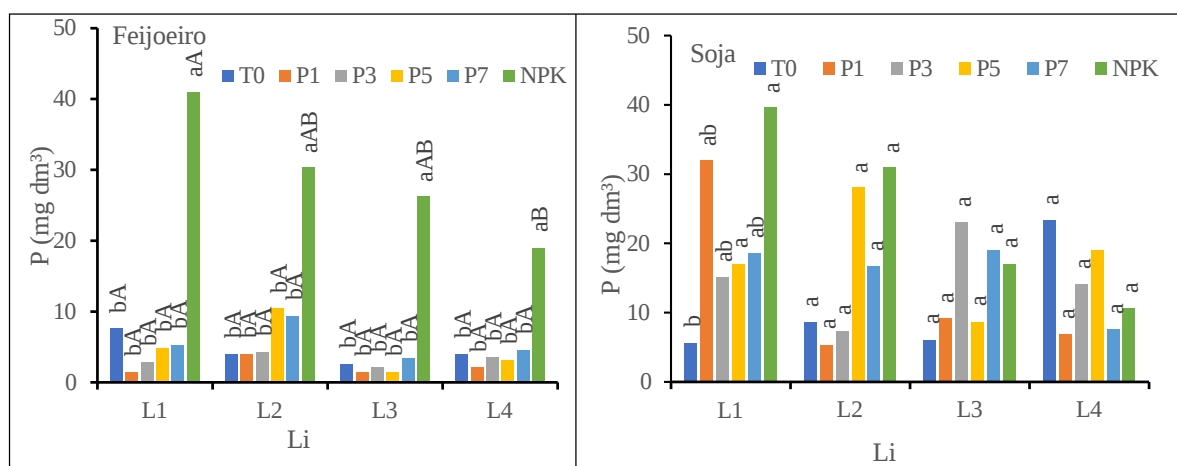


Figura 27. Análise do P do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes Li para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma Li não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A eficiência do tratamento com o fertilizante NPK em L1 reflete a importância de uma adequada combinação entre irrigação e fertilização para otimizar a disponibilidade de P no solo. O uso do NPK é amplamente reconhecido por sua alta solubilidade e pela rápida liberação de P, o que torna esse fertilizante particularmente eficaz quando combinado com uma irrigação eficiente. De acordo com Raij (2011), a combinação de práticas como a aplicação de fertilizantes solúveis e a irrigação adequada são essenciais para o aumento da produtividade das culturas. A solubilização do P pelas águas de irrigação permite que as raízes das plantas acessem este nutriente de maneira mais eficiente, favorecendo seu crescimento e desenvolvimento.

Nos Li de L3 e L4 no final do ciclo da soja, houve menores valores numéricos quando do uso de NPK em relação às doses de PR (Tabela 28). Theodoro *et al.* (2013), que apontam para uma liberação gradual de fósforo do PR, que é mais eficaz a longo prazo, mas não proporciona os mesmos resultados imediatos que os fertilizantes solúveis como o NPK. Ao mesmo tempo o solo no final do ciclo da soja, houve interação entre as doses de PR e NPK, onde na Li de L1, NPK (39,6 mg dm³) foi maior que T0 (5,6 mg dm³) (Figura 28)

O impacto da irrigação nos teores de P no solo podem ser associados também à dinâmica da água no solo. Estudos de Allen *et al.* (1998) demonstram que a água é crucial para a difusão de nutrientes como o P nas camadas superiores do solo. Quando a irrigação é insuficiente, a movimentação de água no solo não é suficiente para transportar os nutrientes para as raízes das plantas, resultando em baixos níveis de P disponíveis.

Segundo Almeida Júnior *et al.* (2022), a eficiência do uso de P pode ser maximizada quando o fertilizante é aplicado de forma que ele seja prontamente disponível para as plantas e a irrigação facilita sua distribuição no solo.

Os resultados obtidos confirmam que o fósforo liberado pelo PR pode complementar a fertilização convencional, promovendo benefícios tanto no curto quanto no longo prazo, especialmente em solos corrigidos.

Alovisi *et al.* (2021) investigaram o uso de PR basáltico como fertilizante alternativo na cultura da soja. Os resultados indicaram que a adubação química com NPK influenciou os teores de nutrientes P, K e Mn no solo, com aumento dos teores de P e K na camada de 0-10 cm. Em contraste, o uso de PR resultou em menor disponibilidade imediata de P, sugerindo que, para culturas como a soja, a adubação com NPK proporciona teores mais elevados de P no solo em comparação com o PR, similarmente ao que foi verificado neste experimento.

- Potássio (K^+)

O solo utilizado no experimento já apresentava elevados teores de K em sua composição natural, o que pode ter influenciado a resposta dos tratamentos de adubação. Em solos com alta disponibilidade desse nutriente, a aplicação de fontes adicionais de K tende a gerar respostas menos expressivas, uma vez que as plantas já encontram quantidades adequadas para seu desenvolvimento (SILVA *et al.*, 2017). No ciclo do feijoeiro os teores de K foram numericamente maiores considerando a média da Li dentro de cada dose de PR (variação máxima de 19,70%), se comparada à média destas dentro de cada Li (variação máxima de 23,70%), já no final do ciclo da soja apresentaram variações similares (Figura 29).

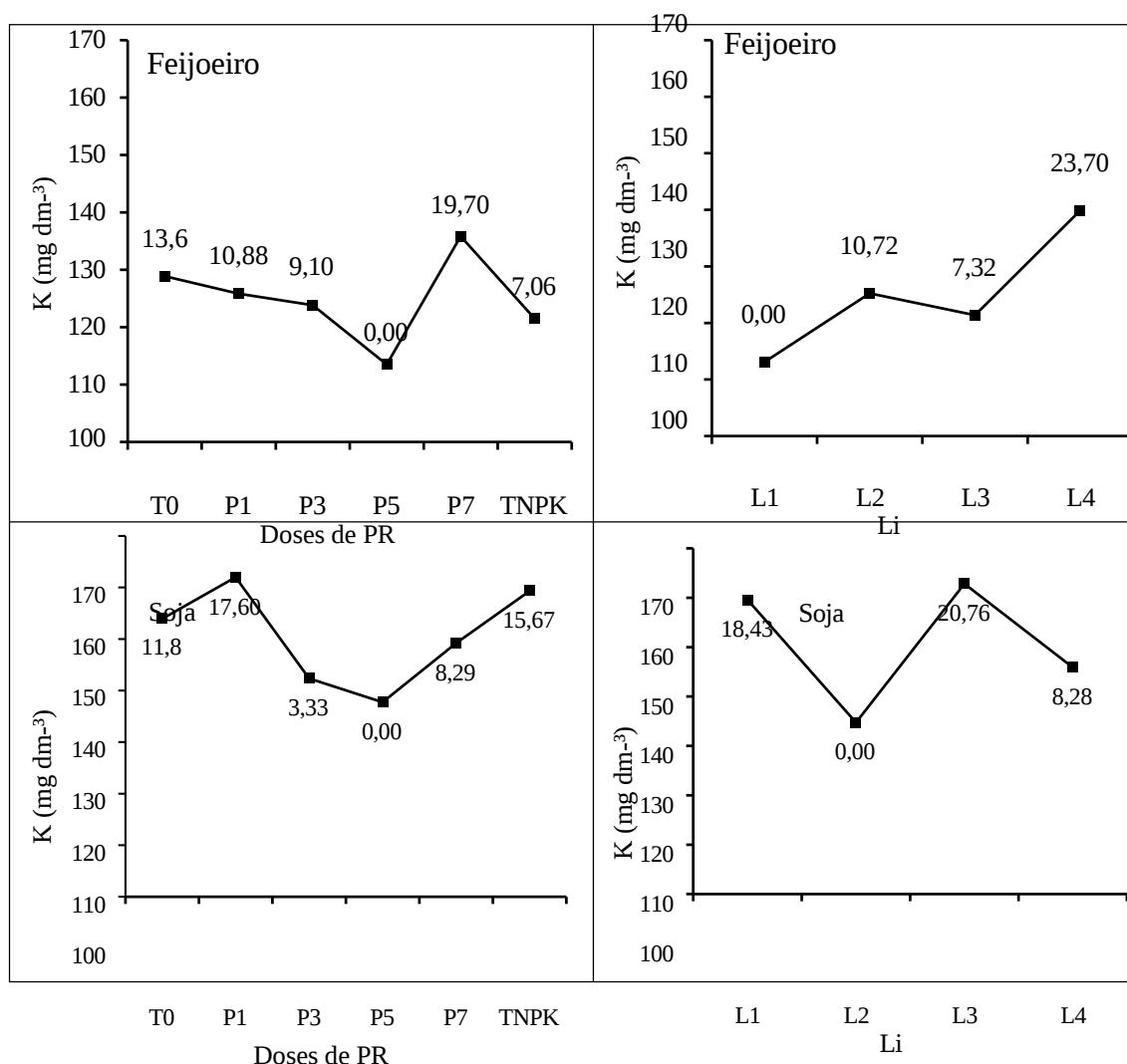


Figura 28. Valores médios de K^+ do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja em função das doses de PR e NPK e das Li e variação percentual considerando o menor valor como referência.

Além disso, a capacidade de retenção de K^+ no solo pode ter contribuído para a estabilidade dos teores observados ao longo do ciclo das culturas. Segundo estudos de Santos *et al.* (2020), solos com textura média e argilosa ou com alta CTC possuem maior capacidade de armazenar P disponível para as plantas, diminuindo a necessidade de adubações complementares. Dessa forma, mesmo com a aplicação de diferentes fontes de K^+ , a resposta das plantas pode ter sido limitada pela própria disponibilidade pré-existente no solo, explicando a pouca variação nos resultados obtidos entre os tratamentos.

Um fator importante a ser observado é o maior (em média) do teor de K^+ no solo no final do ciclo soja, que pode estar relacionado tanto a liberação pelo PR no segundo ano do experimento, como ainda relacionado às diferentes necessidades nutricionais dos cultivos. Portanto, a interação entre Li e o tipo de fertilizante pode influenciar diretamente a absorção de PK pelo feijoeiro e pela soja.

A absorção do K^+ pelo feijoeiro é diretamente influenciada pela disponibilidade de água no solo e pelo manejo da adubação (TAIZ *et al.*, 2017). De acordo com Marschner

(2012), a absorção de K^+ é altamente dependente da umidade do solo, pois o transporte desse nutriente ocorre por fluxo de massa, sendo facilitado pela presença de água disponível para as raízes, mas a umidade excessiva pode lixiviar esses mesmos nutrientes. Malavolta (2006) destaca que o equilíbrio entre nutrientes é fundamental para a absorção de K, pois esse nutriente interage com o P e N no metabolismo vegetal.

Nesse contexto, o K^+ surge como fundamental, já que sua presença contribui significativamente para o desenvolvimento das plantas, atuando na regulação osmótica, ativação enzimática e transporte de fotoassimilados. Além disso, sua dinâmica no solo está diretamente relacionada à MO, que influencia a retenção e disponibilidade desse nutriente ao longo do ciclo das culturas (SANTOS *et al.*, 2020). A elevada fertilidade do solo, especialmente no que se refere ao teor de K, pode ter reduzido o impacto da adubação adicional, uma vez que as plantas já dispunham de quantidades adequadas para seu crescimento.

- Matéria orgânica (MO)

Para o feijoeiro (Figura 30) não houve qualquer variação estatística dentro do parâmetro MO.

O aumento das Li poderia demonstrar um impacto positivo na MOS, promovendo seu acúmulo e melhor distribuição no perfil do solo. A maior disponibilidade de água favorece a infiltração e a retenção de MOS nos agregados do solo, contribuindo para a melhoria da estrutura física e da capacidade de retenção de nutrientes (Souza *et al.*, 2020). Além disso, solos com maior umidade tendem a manter a MOS mais protegida, reduzindo perdas e favorecendo sua estabilidade ao longo do tempo (Silva e Oliveira, 2019). Esse fator é essencial para sistemas agrícolas sustentáveis, nos quais a manutenção da matéria orgânica é fundamental para a fertilidade e longevidade produtiva do solo (Mendes *et al.*, 2018).

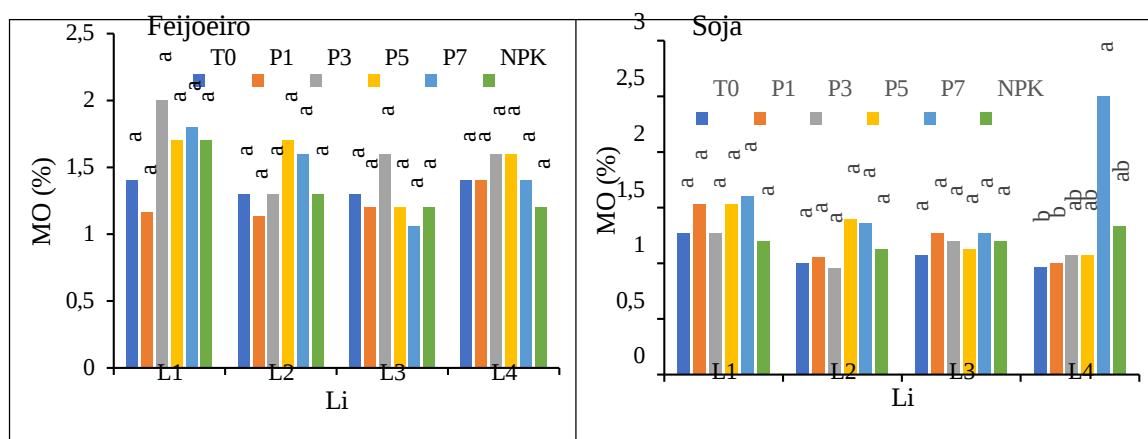


Figura 29. Análise da MO do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre diferentes Li para a mesma dose de PR ou NPK e minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma Li não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Este estudo encontrou dados semelhantes ao observado por Ribeiro *et al* (2009), onde testando diferentes lâminas de irrigação (0 e 100% da ETc) para duas espécies forrageiras no estado do Rio de Janeiro, não foram observadas diferenças nos teores de MO no solo cultivado. Estudo de Vitor *et al.* (2009) por sua vez também não encontrou diferentes teores de matéria orgânica associados a diferentes Li (0, 20, 40, 80, 100 ou 120% da Etc) para duas forrageiras cultivadas em região do cerrado mineiro.

No gráfico da soja (Figura 30), observa-se que a lâmina L4, com o tratamento P7, apresenta o valor mais alto de MO, com aproximadamente 2,5%, seguido pelos tratamentos com NPK e P5, que possuem valores próximos de 1,5 a 2,0%, sendo estatisticamente diferente de T0 e P1 (0,96 e 1% respectivamente).

Em relação aos tratamentos de fertilização, a aplicação de P7 apresentou um desempenho superior, o que pode ser explicado pela liberação gradual de nutrientes, favorecendo a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes no solo. Este efeito é consistente com os estudos de Theodoro *et al.* (2013), que discutem a aplicação de remineralizadores e seu impacto na melhoria das propriedades do solo, incluindo o aumento da matéria orgânica. Além disso, o uso de fertilizantes como o NPK, que combina nutrientes essenciais como fósforo, nitrogênio e potássio, também contribui para a formação de MO, mas de maneira mais moderada em comparação ao PR em maiores doses.

Outro ponto relevante é a diferença no comportamento entre as culturas da soja e do feijoeiro. Observou-se que a soja parece ser mais sensível às diferentes doses de Li, possivelmente devido a seu maior porte e demanda hídrica durante o ciclo de crescimento.

Isso reforça os resultados de Bastos *et al.* (2007), que afirmam que culturas como a soja podem ser mais beneficiadas com um manejo restritivo de Li em comparação com outras culturas da mesma família botânica, devido ao seu sistema radicular ser mais desenvolvido.

Além disso, a resposta positiva ao uso de PR pode ser interpretada como uma evidência de que práticas de rochagem podem ser uma estratégia eficiente para a sustentabilidade da agricultura, especialmente em solos tropicais, onde a fertilização convencional pode não ser suficiente para atender às necessidades nutricionais das plantas. A remineralização, como descrito por Theodoro *et al.* (2013), oferece uma alternativa sustentável ao uso excessivo de fertilizantes sintéticos, promovendo não só a melhoria da qualidade do solo, mas também o aumento da capacidade de retenção de nutrientes e matéria orgânica.

A MO também atua como reservatório de nutrientes, sendo gradualmente liberados para as plantas. Marschner (2012) destaca que essa dinâmica contribui para a estabilidade química do solo, essencial para cultivos de ciclo longo, como o feijoeiro e a soja. Apesar de a interação entre PR e irrigação não apresentar significância estatística, pequenas variações nos dados indicam o potencial do PR como insumo para a construção da fertilidade do solo a longo prazo. Lovato *et al.* (2018) ressaltam que o PR é uma alternativa sustentável para melhorar a MO em solos tropicais, promovendo efeitos cumulativos positivos com aplicações contínuas.

A MO contribui para minimizar a lixiviação em solos tropicais, enquanto o PR libera minerais gradualmente, aumentando a eficiência da retenção de nutrientes. Swoboda *et al.* (2022) destacam a importância da atividade microbiana na decomposição da MO e liberação de nutrientes, o que reforça a necessidade de manejo hídrico equilibrado. A interação entre microrganismos do solo e o PR potencializa a decomposição da MO, promovendo maior liberação de nutrientes essenciais.

A análise dos teores da MO evidenciou sua relevância para a melhoria da qualidade do solo, promovendo benefícios como a retenção de nutrientes e a estabilidade química. No entanto, para compreender plenamente a dinâmica da fertilidade do solo, é essencial avaliar a saturação de alumínio (SAI), um parâmetro que reflete o potencial tóxico desse elemento em solos ácidos. A SAI está diretamente relacionada à disponibilidade de nutrientes e ao desenvolvimento radicular das plantas, sendo fundamental monitorar como práticas de manejo, como o uso de pó de rocha (PR) e diferentes lâminas de

irrigação, impactam esse atributo. A seguir, serão apresentados os resultados e a discussão sobre os níveis de saturação de alumínio ao final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.

- Saturação de alumínio (SatAl)

Observou-se no solo do cultivo do feijoeiro alguns valores isolados de presença de SatAl, de maneira similar ao que ocorreu com o alumínio trocável, principalmente para o NPK. Além disso, observa-se que em L1 o teor de SatAl foi maior numericamente (Figura 31). Na L2, os teores de SatAl foram menores que em L1. Na lâmina L4, o tratamento T0 apresentou SatAl de 1,33%, inferior ao obtido na dose de PR P3 na L1 (1,94%) (Figura 31).

A variação de SatAl pode estar relacionada à composição mineralógica do PR, pois a dissolução de minerais silicatados é um processo lento e pode não ter sido suficiente para neutralizar a acidez do solo no curto prazo (Mendonça *et al.*, 2021). Além disso, fatores como a textura e a CTC do solo podem interferir na eficiência dos remineralizadores na redução da toxicidade do Al, exigindo um manejo mais prolongado para que seus efeitos sejam plenamente observados.

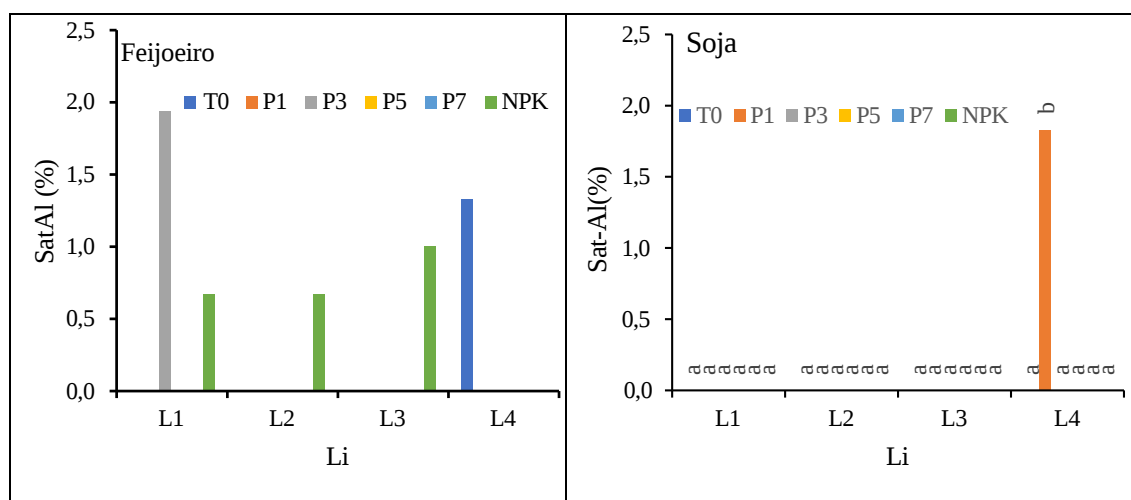


Figura 30. Análise do Sat Al do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja.

Médias seguidas de minúsculas entre diferentes doses de PR ou NPK para a mesma lâmina de irrigação não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Ainda no solo do cultivo do feijoeiro, o tratamento NPK na L4 apresentou 1,0% de SatAl. Isso sugere que a aplicação destes nutrientes pode ser menos eficiente do que o PR, que teria uma liberação mais gradual. Segundo Miao *et al.* (2019), a adubação mineral pode favorecer o crescimento radicular e melhorar a absorção de nutrientes, minimizando os efeitos prejudiciais da acidez do solo. Dessa forma, o uso de fertilizantes sintéticos

combinado com remineralizadores pode representar uma estratégia eficiente para melhorar a fertilidade do solo e a sustentabilidade agrícola, especialmente em solos que apresentam elevada SatAl.

A maior disponibilidade hídrica favorece a mobilização de íons e pode auxiliar na remoção do alumínio da zona radicular, diminuindo seu efeito tóxico sobre as plantas (Ferreira *et al.*, 2018). Além disso, solos com maior teor de umidade tendem a favorecer a estabilidade da MO, que, por sua vez, pode complexar o Al e reduzir sua biodisponibilidade.

No solo do cultivo de soja (Figura 31), observa-se que na dose de PR de P1 a L4 apresenta teor de SatAl de 1,8%, sugerindo que nessas condições há um controle eficiente da toxicidade do alumínio no solo. Esse comportamento pode ser explicado pela ação conjunta da irrigação e dos tratamentos aplicados, que podem ter promovido a neutralização do alumínio ou sua imobilização no perfil do solo, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (Silva *et al.*, 2020).

Esse resultado indica que a menor disponibilidade hídrica pode ter contribuído para o acúmulo de alumínio no solo, tornando-o mais disponível para as plantas. A restrição hídrica pode reduzir a lixiviação do alumínio e favorecer sua retenção na superfície do solo, aumentando sua toxicidade para a cultura da soja (Mendonça *et al.*, 2021). Estudos de longa duração seriam necessários para avaliar se a aplicação contínua de PR pode ter um efeito acumulativo na redução da SatAl, em solos tropicais, especialmente em sistemas de cultivo rotacionados. A ausência de alumínio trocável indica que o solo possui características adequadas para a implantação de sistemas agrícolas mais intensivos, sem os impactos negativos associados à toxicidade do alumínio. Gillman *et al.* (2002) observaram que doses moderadas de remineralizadores podem melhorar a CTC sem alterar significativamente a SatAl. Por sua vez, Alves *et.al.* (2021), testaram diferentes doses de PR (0; 1,25; 2,5; 3,75 e 5,0 t ha⁻¹) para o cultivo de feijoeiro no norte de Minas Gerais e não encontraram diferenças significativas nos teores de SatAl.

- Saturação de Bases (SB)

Observa-se que não houve interação entre os fatores doses de PR e Li e nem entre dentro de cada fator individualmente. No final do ciclo do feijoeiro a SB no L1 era de 69,67 cmol_c dm⁻³ apresentando elevação em valor número com redução da Li, chegando a 73,53 cmol_c dm⁻³ na L3 (8,41%). Já no final do ciclo da soja, ocorreu o inverso, ou seja, tendência aumento em valores numéricos com o aumento da Li, passando de 77,33

$\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ em L4 para $85,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em L3, sendo este o máximo valor, o que corresponde a 11,1%. Porém observa-se que houve maiores valores em todas as Li no final do ciclo da soja em relação ao final do ciclo do feijoeiro (Figura 31).

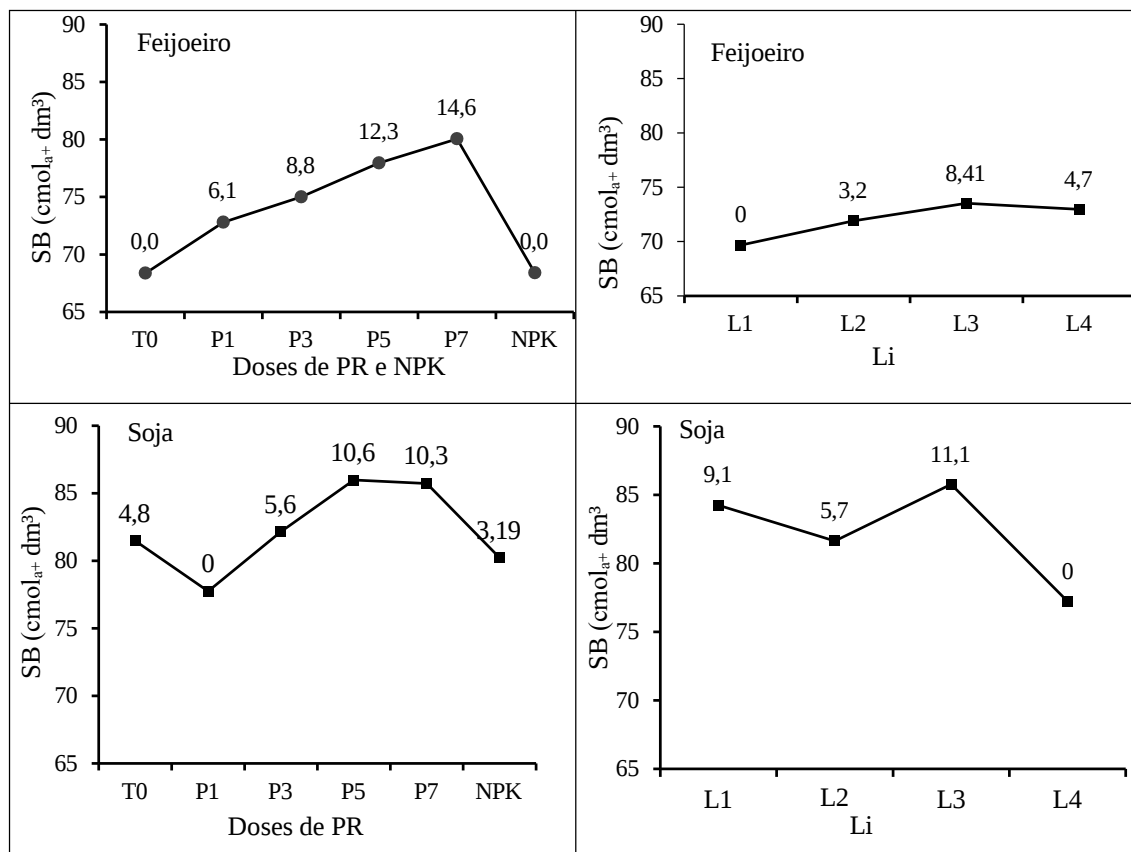


Figura 31. Valores médios de SB do solo no final do ciclo de cultivo do feijoeiro e da soja em função das doses de PR e NPK e das Li e variação percentual considerando o menor valor como referência.

Em relação ao uso de PR no final do ciclo do feijoeiro houve aumento da SB em valor numérico, passando de $68,37 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (T0) para $80,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (P7), ou seja, 14,6% de elevação, porém no ciclo do feijoeiro também houve aumento em valor numérico entre P1 e P7, porém sendo de apenas 10,3%, enquanto que tanto no final do ciclo do feijoeiro como da soja a SB de T0 e NPK foram praticamente iguais. Assim como ocorreu com a Li, em todas as doses de PR e NPK foram maiores em valor numérico (não se aplicou análise estatística) no final do ciclo da soja em relação ao final do ciclo do feijoeiro, demonstrando que tanto o PR como o NPK favoreceram a elevação da SB, mesmo que de forma reduzida (Figura 31).

Alves *et al.* (2021) por sua vez ao avaliarem diferentes doses de PR (1,25; 2,5; 3,75 e $5,0 \text{ t ha}^{-1}$) também não observaram aumento significativo na SB no solo, neste sentido,

é recomendável que seja avaliado o solo por um período maior de tempo, já que, de maneira geral houve elevação em valor numérico. Toscani e Campos (2017) analisaram a resposta do PR (remineralizadores de fosforito, basalto e dolomito fosfatado) comparativamente com os fertilizantes solúveis (40 N, 30 P, 10 K) e o Latossolo controle, onde concluíram que naquelas condições a rochagem apresentou efeito residual e aumentou o pH e a SB e diminuiu a saturação por alumínio e o teor de matéria orgânica do solo, quando comparados aos resultados do NPK, concordando em parte com este estudo.

Os dados obtidos indicaram que o uso de fertilizantes minerais, como o NPK, levou a um aumento significativo nos parâmetros de fertilidade do solo, embora a variação da SB e a capacidade de retenção de nutrientes tenha sido não significativa, o que era esperado considerando a composição do fertilizante químico, rica em macronutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio. O aumento das doses de PR, por sua vez, apresenta um aumento gradual, com efeito mais notável nas Li e doses de PR, especialmente no final do ciclo do feijoeiro.

A diferença de resposta entre as culturas pode ser atribuída às características específicas de cada planta, que têm diferentes demandas nutricionais e padrões de absorção. O feijoeiro, por exemplo, pode ser mais sensível à disponibilidade de nutrientes de forma imediata, enquanto a soja, devido ao seu porte maior e maior necessidade de nutrientes, pode se beneficiar de uma liberação mais gradual dos nutrientes proporcionada pelo PR. Isso reforça a necessidade de ajustar os tratamentos de fertilização de acordo com as necessidades específicas das culturas e as condições do solo (Fageria, 2014).

De maneira geral, os resultados deste estudo reforçam a importância de um manejo integrado de solo, que combine fertilização mineral com remineralizadores naturais e práticas adequadas de irrigação. A utilização de NPK e PR em conjunto com uma gestão eficiente da irrigação pode proporcionar benefícios tanto no curto quanto no longo prazo, melhorando a fertilidade do solo, a produtividade das culturas e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A adaptação das práticas de manejo de acordo com as condições locais e as necessidades das culturas é fundamental para alcançar altos rendimentos de forma sustentável e com baixos impactos ambientais.

Por fim, o uso de remineralizadores como o PR, aliado a fertilização adequada e gestão de irrigação, pode contribuir para a redução da dependência de fertilizantes químicos, promovendo a sustentabilidade na agricultura. A combinação de diferentes

fontes de nutrientes, como o PR e o NPK, oferece uma abordagem mais holística, que pode beneficiar a saúde do solo e garantir a produtividade das culturas no longo prazo.

Os resultados confirmaram que a aplicação de PR foi eficaz na neutralização da acidez do solo, especialmente nas doses mais altas, demonstrando um efeito positivo no aumento do pH e na redução da saturação de alumínio. A adição de PR, com doses de 5 e 7 t ha⁻¹, favoreceram a liberação gradual de nutrientes essenciais, como Ca e Mg, que contribuíram para a melhoria da estrutura do solo e a promoção de um ambiente mais favorável ao crescimento das culturas. Além disso, a irrigação desempenhou um papel fundamental na otimização dos efeitos do PR, mostrando que as Li mais altas (L1 e L2) maximizaram a eficiência desses fertilizantes, promovendo uma maior mobilização dos nutrientes no solo.

A pesquisa sugere que o uso de remineralizadores como o PR, aliado a práticas de irrigação controlada, pode ser uma solução eficaz para a recuperação e manutenção da saúde do solo em regiões tropicais, promovendo uma agricultura mais sustentável e com menor impacto ambiental.

5.5 Análise multivariada dos componentes químicos do solo

5.5.1 Atributos químicos do solo no final do ciclo do feijoeiro

A Figura 32 traz os escores e permite uma melhor visualização das setas indicadoras ao longo do eixo longitudinal, que indicam o sentido da máxima variação e devem ter comprimento proporcional à importância da variação. Com exceção do P, todos os demais atributos químicos do solo mostraram que possuem concordância entre eles, pois as setas estão indicando a mesma direção. O gráfico *biplot* explica 41,52% na componente principal 1 (CP1) e de 28,34% na componente principal 2 (CP2), que juntos representam 69,86%, o que possibilita notar que as variáveis formam de maneira geral três grupos principais, um formado por Ca, Ca+Mg e CTC e outro pelo Mg, MO, K e H+Al, um terceiro grupo representado pelo pH e SB, já o P aparece isolado dos demais.

A SB, demonstrou maior contribuição positiva no PC1, evidenciando sua importância no equilíbrio químico do solo, sendo determinante para a fertilidade do solo, principalmente com o uso das doses de PR de P5 e P7 e de NPK.

Os atributos Ca + Mg apresentaram alta correlação com a CTC, confirmando a ação positiva do PR e do NPK na disponibilização de bases, bastante evidente na dose de PR

de P5. Portanto, pode-se afirmar que as doses mais elevadas de PR (P5 e P7) e a aplicação de NPK se destacam na disponibilização desses atributos, promovendo melhora na composição química do solo. O pH também apresentou correlação positiva no CP1, porém, menos elevada que a SB, CTC, Ca+Mg e Ca, especialmente na dose PR P5 e L4 de L4 (Figura 32).

As variáveis SB e H + Al apresentam-se distanciada pouco superior a 90°, sendo, então, negativamente correlacionadas, ao passo que pH, CTC, Ca, Ca+Mg, Mg e MO apresentam um ângulo menor do que 90° e estão positivamente correlacionadas. A MO por exemplo, sugere que a aplicação de PR e NPK contribui para a estabilidade e retenção de nutrientes, além de aumentar a disponibilidade de bases no solo. O Al não foi apresentado no gráfico por não ter sido identificado em todos os tratamentos, mas demonstrou reduções, mesmo que em valor numérico em praticamente todos os tratamentos, evidenciando a influência do PR na redução da sua toxicidade. Esse efeito é essencial para a melhoria da fertilidade em solos com altos níveis de acidez.

O P apresentou correlação negativa, porém, menor do que os atributos Mg, MO, H+Al que apresentaram correlação elevada na componente principal 1 (CP1), tendo a elevação de P forte relação com a aplicação de NPK (Figura 32).

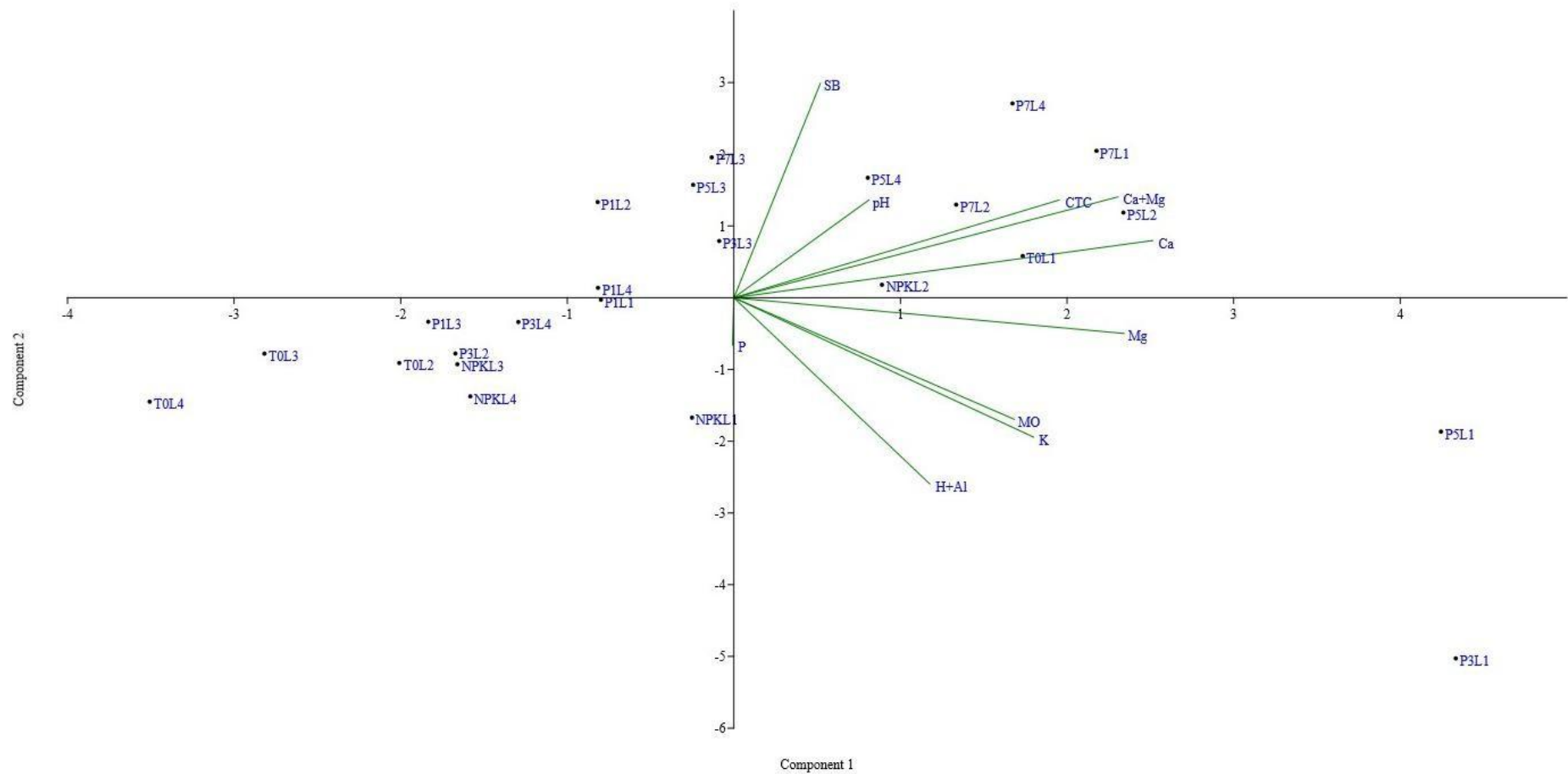


Figura 32. *Biplot* dos componentes principais (PC1 e PC2) e projeção das variáveis de solo, doses de PR, NPK e Li no final do ciclo do feijoeiro.

6.5.2 Atributos químicos do solo no final do ciclo da soja

Observa-se que com exceção do H+Al, todos os demais atributos químicos do solo mostraram que possuem concordância entre eles, pois as setas estão indicando a mesma direção. No gráfico biplot, 54,69% é explicado pelo componente principal 1 (CP1) e 20,27% pela componente principal 2 (CP2), e, juntos representam 74,85%, ao mesmo tempo é possível notar que as variáveis formam basicamente dois grupos, o grupo 1 formado por Ca, Ca+Mg, MO, P e K e o grupo 2 formado pelo Mg, SB e pH e já o H+Al ficou isolado. Observa-se que o H+Al e o P estão correlacionado negativamente com o pH e SB por formarem um ângulo entre si maior que 90°. Por sua vez, todos os demais atributos estão positivamente correlacionados, pois o ângulo formado entre eles é menor que 90° (Figura 33).

O P apresentou correlação positiva elevada com o Ca, Ca+Mg, MO e K interferindo no teor de fertilização do solo, notadamente nas doses de PR de P5 e P7 na Li de L1, similarmente ao observado no solo após o cultivo do feijoeiro, porém com de forma mais evidente, pois acredita-se que houve liberação gradual de P no solo, facilitado pelos reduzidos teores no solo antes da aplicação do PR (Figura 33).

No grupo 2, a SB e o pH apresentaram praticamente o mesmo comportamento, sendo influenciadas especialmente nas doses de PR de P5 e P7, onde a SB está diretamente relacionada à dinâmica de correção da acidez e à disponibilidade de cátions como Ca e Mg.

A CTC que apresentou correlação forte e positiva, o que reflete a capacidade do solo de reter e disponibilizar nutrientes às plantas, sendo influenciada pela quantidade disponível de MO, que atua como um reservatório de nutrientes e melhora a estrutura do solo (Figura 34). O P também apresentou correlação forte e positiva, sendo sensível às doses de NPK, reforçando a necessidade de integração entre remineralizadores e fertilizantes convencionais para potencializar a disponibilidade de nutrientes no solo. Este comportamento é fundamental para culturas que exigem alta disponibilidade de fósforo, como o feijoeiro.

A MO apresentou alta correlação com a CTC, Ca, Ca+Mg, indicando sua contribuição para a retenção de cátions no solo. Este resultado reforça que práticas que promovem o acúmulo de MO, são essenciais para a sustentabilidade agrícola no Cerrado. A sinergia entre esses insumos contribuiu para a elevação da SB e da CTC, melhorando a fertilidade química do solo.

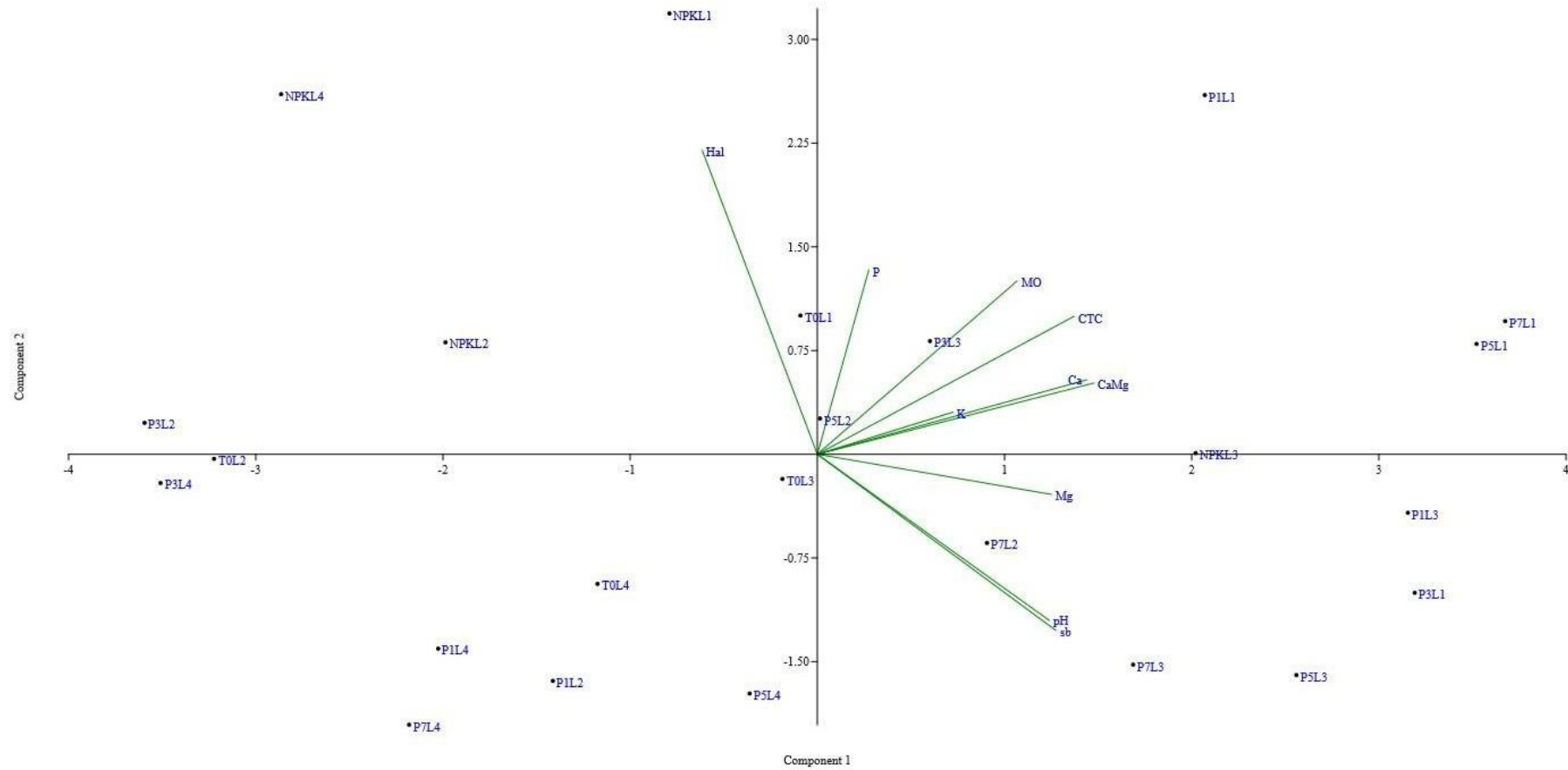


Figura 33. *Biplot* dos componentes principais (PC1 e PC2) e projeção das variáveis de solo, doses de PR, NPK e Li no final do ciclo da soja precedida de um ciclo da soja.

Os resultados obtidos no final do ciclo da soja evidenciam que o PR promoveu melhorias na fertilidade de maneira mais evidente nas doses de 5 e 7 t ha⁻¹, onde a sinergia entre o remineralizador, NPK e manejo hídrico é uma prática promissora na melhoria da composição química do solo.

7. CONCLUSÕES

A maior dose de PR (7 t ha⁻¹) e Li de 100 e 120% da ETc apresentaram comportamento similar ao uso de NPK quanto aos parâmetros morfológicos AP, MuAe, MsAe, MuRa e MsRa. O DC com NPK foi superior às doses de PR, desde que fornecida irrigação suficiente às plantas de feijoeiro.

A dose de 7 t ha⁻¹ de PR e NPK resultaram em valores mais elevados de taxa de transpiração, carbono interno da folha e de eficiência instantânea da carboxilação para o feijoeiro. Os resultados de EiC e EUA indicam que Li menores podem levar a planta a ter maior eficiência metabólica em busca da economia de água e energia.

A redução das Li no feijoeiro resultou em menor efeito das doses de PR sobre a produção de massa úmida da parte aérea do feijoeiro, onde, com 60% da ETc, só foi influenciada de forma significativa quando do uso de NPK, o que não ocorreu nas demais Li, confirmando, com isso, interação entre as doses de PR e Li.

Em relação à soja observou-se que AP e DC não variaram em qualquer tratamento, assim como para os fatores NG e PMS. Em relação a NV houve um pequeno aumento numérico dos seus valores na Li maior (L1) e menor (L4). Foi notado ainda uma tendência de maior produtividade associado ao uso de NPK, em relação a P0 e T1, sem interferência das Li.

Ainda para a soja os parâmetros fisiológicos apontam que em relação a Ci e A, observa-se que as menores Li promoveram uma maior retenção de CO₂, porém este aumento não promoveu efetivo aumento da taxa fotossintética. Em relação ao gs houve um discreto aumento em L1 para a adubação com P7, não havendo variação para o parâmetro E.

A EiC foi responsiva as maiores Li, sendo que EUA não apresentou qualquer diferenciação entre os tratamentos.

No que se refere aos atributos químicos do solo, no final dos ciclos do feijoeiro e da soja, o uso de PR e NPK não influenciaram significativamente no valor de pH do solo,

porém as doses de PR de P5 e P7, mostrou tendência de elevação do pH do solo com valor numérico maior, mantendo os níveis de Al e SatAl reduzidos e aumentando a disponibilidade de cátions essenciais como Ca e Mg.

Tanto no final do ciclo do feijoeiro como da soja, a CTC foi superior nas maiores Li e doses de PR, correspondentes a P5 e P7. O P foi superior nos tratamentos com NPK, e o K não variou em nenhum dos tratamentos, devido ao alto teor no solo naturalmente no início do experimento.

Em relação a MO não houve qualquer variação para o feijoeiro, já no cultivo da soja houve variação em L4, sendo que o P7 foi estatisticamente superior as demais doses de PR.

O PR mostrou-se eficiente em ambas as culturas avaliadas, mas os resultados foram particularmente promissores na soja, onde os efeitos sobre a fertilidade do solo e a produtividade das plantas foram mais evidentes. Isso sugere que o PR pode ser uma alternativa especialmente viável para o cultivo de soja em sistemas irrigados, além de demonstrar que o poder de reação no solo e sua disponibilidade na solução de solo pode levar um longo período de tempo para ser completamente realizada.

8. REFERÊNCIAS

- AARNIO, T.; RÄTY, M.; MARTIKAINEN, P.J. Long-term availability of nutrients in forest soil derived from fast- and slow-release fertilizers. **Plant Soil**, v. 252, p. 227–239, 2003.
- ABREU, A.F.B.; RAMALHO, M.A.P.; CARNEIRO, J.E.S.; MELO, L.C.; PEREIRA, H.S.; SOUZA, T.L.P.O.; PAULA JÚNIOR, T.J.; SOUZA, E.A.; PEREIRA FILHO, I.A.; MARTINS, M.; GUIDICE, M.P.; VIERIA, R.F. **BRSMG Uai: Cultivar de Feijão Tipo Carioca com Planta de Arquitetura Ereta**. EMBRAPA, Comunicado Técnico 246, 2018.
- AGRANDA. Feijão Carioca TAA Dama. Disponível em: <https://www.agranda.com.br/produto/feijao-carioca-taa-dama/>. Visto em: 22/06/2022.
- AGRIANUAL. **Anuário da Agricultura Brasileira**. São Paulo: Instituto FNP, 2017. Disponível em: <<http://www.agrianual.com.br>>. Acesso em 17 de novembro de 2020.

- AGROADVANCE. **6 maiores produtores de soja do mundo: quando e quanto produzem?**, 2023. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-6-maiores-produtores-de-soja-do-mundo/#comments>. Acesso em: 24/01/2024.
- ALEMAN, C.C.; MIGNACCA, F.A. Avaliações morfofisiológicas do feijão pérola irrigado. **Colloquium Agrariae**, v. 11, n.2, p.19-24, 2015.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Food and Agriculture Organization, Rome. 1998. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 27/12/2021.
- ALMANÇA, M.A.K. **Trichoderma sp. no controle de doenças e na promoção do crescimento de plantas de arroz**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 81 p, 2005.
- ALMEIDA JÚNIOR, J. J.; SMILJANIC, K. B. A.; MATOS, F. S. A.; PEREIRA, R. M.; DA SILVA FILHO, E. T.; SALVADORI, H. R.; MENDONÇA, A. F., DOS SANTOS; M. M., SIMON; G. A., BARBOSA, U. R.; MIRANDA, B. C.; SILVA, V. J. A. Remineralizador de solo utilizado como alternativa sustentável para fertilização de solos na cultura da soja no Centro-Oeste do Brasil. **Conjecturas**, v.22, n.9, p.486–498, 2022. Doi: <https://doi.org/10.53660/CONJ-1289-X57>
- ALMEIDA JUNIOR, J.J.; SMILJANIC, K.B.A.; MATOS, F.S.A.; PEROZINI, A.C.; SOUZA, J.V.A. RIBEIRO JUNIOR, L.F. SILVA, R.F.; ARAUJO, S.L. DUTRA, J.M.; LIBERATO, P.V. Análise das variáveis tecnológicas do milho em função das doses crescentes de condicionador PR. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 88440-88446, 2020.
- ALOVISI, A.A.; LUZ, R.A.; ALOVISI, A.M.T.; TOKURA, L.K.; GOMES, C.F.; CASSOL, C.J. Silicatagem no solo e na produtividade da cultura do milho. **Revista Gestão Sustentável Ambiental**, v. 9, n. esp., p. 933-950, 2020.
- ALOVISI, A.M.T.; RODRIGUES, R.B.; ALOVISI, A.A.; TEBAR, M.M.; VILLALBA, L.A.; MUGLIA, G.R.P.; SOARES, M.S.P.; TOKURA, L.K.; CASSOL, C.J.; SILVA, R.S.; GNING, A.; KAI, P.M. Uso do PR basáltica como fertilizante alternativo na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 10, n.6, 2021.
- ALOVISI, A.M.T.; FRANCO, T.; ALOVISI, A.A.; HARTMANN, C.F.; TOKURA, L.K.; SILVA, R.S. Atributos de fertilidade do solo e produtividade de milho e soja

- influenciados pela rochagem. Edição Especial: **II Seminário de Engenharia de Energia na Agricultura Acta Iguazu**, v. 6, n. 5, p. 57-68, 2017.
- ALOVISI, A. M. T.; SAMPAIO, M. F.; PEREIRA, M. G. Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. **Acta Iguazu**, v.6, n.5, p.69-79, 2017.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's Climate Classification Map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p.711-728. 2013.
- ALVES, M. E.; MASCARENHAS, Y. P.; VAZ, C. M. P. **Aspectos teóricos e perspectivas da aplicação do método de Rietveld à quantificação mineralógica de solos**. São Carlos: Embrapa, 2005. 39 p.
- ALVES, P.F.S; SAMPAIO, R.A.; KONDO, M.K.; FERREIRA, V.G.; PEGORARO, R.F. PR como condicionador de solo para o feijoeiro no norte de Minas Gerais. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, 2021.
- AMARAL NETO, A. **Lâminas de irrigação, supressão hídrica e frequências de fertirrigação potássica na cultura da soja**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/46696/3/2017_tese_alamaralneto.pdf. Acesso: 16/02/2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas de Irrigação**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Boletim do SNIRH, Levantamento da Agricultura Irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2022)**. Boletim do SNIRH, n. 4, 2023.
- ANDA, M., SHAMSHUDDIN, J., FAUZIAH, C. I., OMAR, S. R. S. Improving chemical properties of a highly weathered soil using finely ground basalt rocks. **CATENA**, v.124, p. 147-161, 2015. doi:10.1016/j.catena.2014.09.012.
- AQUINO, J.M.; TANIGUCHI, C.A.K.; MAGINI, C.; BERNI, G.V. The potential of alkaline rocks from the Fortaleza volcanic province (Brazil) as natural fertilizers. **Journal of South American Earth Sciences**, v.103, p. 1-11, 2020.
- AVRAMOVA, V.; ABDELGAWAD, H.; VASILEVA, I.; PETROVA, A. S.; HOLEK, A.; MARIËN, J.; ASARD, H.; BEEMSTER, G. T. High antioxidant activity facilitates maintenance of cell division in leaves of drought tolerant maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, p. 84, 2017.

- AZCÓN, R. “**Papel de la simbiosis micorrízica y su interacción con otros microorganismos rizosféricos en el crecimiento vegetal y sostenibilidad agrícola**”. En: ALARCÓN A. FERRERA CERRATO R.; (eds). *Ecología, Fisiología y Biotecnología de la Micorriza arbuscular*. Colegio de Posgraduados, Ediciones Mundi Prensa, Montecillo, México, p. 1-15, 2000.
- BACH, E. M.; BAER, S. G.; MEYER, C. K.; SIX, J. Soil texture affects soil microbial and structural recovery during grassland restoration. **Soil Biology and Biochemistry**, n.42, v. 12, p. 2182-2191, 2010.
- BAIOCO, R.A.; ORBEN, J.M.C.; PEREIRA, J.R.; ESSER, J.V.; SANTOS, R.F. Impacto da estiagem sobre a safra de soja 2021/22 no núcleo regional de cascavel. **IJERRS**, v.5, n.1, p. 1-11, 2023.
- BALESTRIN, J.T.; FRANDALOSO, D.; CASAGRANDE, R. Influência do tratamento de sementes e da profundidade de semeadura na emergência de plântulas de soja e feijão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 49804-49810, 2020.
- BAMBERG, L.A.; SILVEIRA, C.; EDS, MARTINS; BERGMANN, M.; MARTINAZZO, R.; THEODORO, S.H. **Anais 3 Congresso Brasileiro de Rochagem**, 2017.
- BARBIERI, J.D.; DELLACORT, R.; DANIEL, D.F.; DALCHIAVON, F.C.; FREITAS, P.S.L. Cobertura do solo, evapotranspiração e produtividade do milho safrinha. **Cultura Agronômica**, v.29, n.1, p.76-91, 2020.
- BARBOSA, J.R.; PEREIRA FILHO, J.V.; OLIVEIRA, V.M.; SOUSA, G.G.; GOES, G.F.; LEITE, K.N. Produtividade da cultura da soja irrigada com déficit hídrico regulado no cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.14, nº.4, p. 4200 – 4210, 2020.
- BARSHAD, I. Cation Exchange in micaceous minerals: II. Replaceability of ammonium and potassium from vermiculite, biotite, and montmorillonite. **Soil Science**, 78(1), 57–76. 1954. Disponível em: http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1954/07000/CATION_EXCHANGE_IN_MICACEOUS_MINERALS_II_7.aspx. Acesso em: 18/10/2022.
- BARROSO NETO, J.; SILVA, J. R. I.; BEZERRA, C. W. F.; AMORIM, T. L.; HERMÍNIO, P. J.; MORATO, R. P.; SIMÕES, V. J. L. P. Impactos da seca e das mudanças climáticas no metabolismo das plantas: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v.10, n.8, p.1-13, 2021.

- BASAK, B.B.; SARKAR, B.; BISWAS, D.R.; SARKAR, S.; SANDERSON, P.; NAIDU, R. Bio-Intervention of Naturally Occurring Silicate Minerals for Alternative Source of Potassium. **Elsevier**, p. 115–145, 2017.
- BASAK, B.B.; SARKAR, B.; SANDERSON, P.; NAIDU, R. Wastemineral powder supplies plant available potassium: evaluation of chemical and biological interventions. **J. Geochem. Explor.**, v.186, p. 114–120, 2018.
- BASTIDAS, A. M.; SETIYONO, T. D.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; ELMORE, R. W.; SPECHT, J. E. Soybean sowing date: the vegetative, reproductive, and agronomic impacts. **Agronomy Journal**, v. 100 n 05, p1352-1359, 2008.
- BASTOS, E.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, C.R.; AGUILA, R.M.; CAMPECHE, L.F.MS.; SOUZA, C.F. **Coeficiente de cultivo da soja no Vale do Gurguéia, PI .** XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007.
- BARZOTTO, F. **Influência da rochagem nos atributos químicos do solo e na produtividade da soja.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- BARZOTTO, F. ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; TORRES, R.R.; KIRCHNER, J.H.; ROSSO, R.B.; GIRARDI, L.B.; MEZZOMO, W. Efeito da irrigação e da adubação nitrogenada nos parâmetros de desenvolvimento e nos componentes de produção da cultura da soja. **Espacios**. v. 37, n.21, p.10-18, 2016.
- BATISTA, N. T. F.; RAGAGNIN, V. A.; GÖRGEN, C. A.; MARTINS, E. S.; BIZÃO, A. A.; MORAIS, L. F.; HACK, E.; MARQUES, A. L. G.; CARVALHO, R. S.; ASSIS, L. B.; ARRUDA, E. C. **Uso do PR como condicionador de solos e fertilidade em cultura de cana-de-açúcar.** Anais do II Congresso Brasileiro de Rochagem. Poços de Caldas – MG, p. 58-64, 2013.
- BELADELI, M.N.; COSTA, A.C.T.; DUARTE JUNIOR, J.B.; MISSIO, V.C.; GODINHO, E.Z.; GÊNERO, J.F.S. Uso de fungicidas e *Trichoderma asperellum* para o manejo do crestamento do feijoeiro na segunda safra no Paraná. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.7, p.71158-71167, 2021.
- BELTRÃO JUNIOR, J.A.; COSTA, R.N.T.; LIMA, S.C.R.V.; LINGUEZ, L.M.; SOUZA, P.G.R. FORNECIMENTO RELATIVO DE IRRIGAÇÃO COMO ESTRATÉGIA DE GESTÃO DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO. **Revista Brasileira de**

- Agricultura Irrigada**, Edição Especial, IV INOVAGRI International Meeting, p. 1756 - 1762, 2017.
- BERTOLDO, J.G.; PELISSER, A.; SILVA, R.P.; FAVRETO, R. OLIVEIRA, L.A.D. Alternativas na fertilização de feijão visando a reduzir a aplicação de N-ureia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 348-355, 2015.
- BLANCK, E. Die Glimmer als Kaliquelle für die Pflanzen und ihre Verwitterung [Mica como fonte de potássio para plantas e seu intemperismo]. **Jour. F. Landw.**, 60, 97–110. 1912.
- BLUM, J. D.; KLAUE, A.; NEZAT, C.A.; DRISCOLL, C.T.; JOHNSON, C.E.; SISCCAMA, T.G.; EAGAR, C.; FAHEY, T.J.; LIKENS, G.E. Mycorrhizal weathering of apatite as an important calcium source in base-poor forest ecosystems. **Nature**, v. 417, n.6890, p. 729-731, 2008.
- BOADLE, A. Agricultura e Agronegócio no brasil contribuíram com 23,5 % do PIB em 2017, estima CNA. 2017. Disponível em: extra.globo.com/noticias/economia/agricultura-agronegocio-no-Brasil-contribuiram-com-235-do-pib-2017-estima-cna-22151395.html. Acesso em: 18/11/2020.
- BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil Chemistry**. 3. ed. John Wiley Sons, 2001.
- BOLLAND, M.; BAKER, M.J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 56, p. 59–68, 2000.
- BRAGA, F.M.; FERREIRA, E.A.; CABRAL, C.M.; FREITAS, I.C.; MACIEL, J.C.; FREITAS, M.S.S.; ASPIAZU, I.; SANTOS, J.B.; FERNANDES, L.A.; FRAZÃO, L.A.; SAMPAIO, R.A. Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. 1-14, 2021.
- BRASIL, 2013. Lei nº 12,890/2013 de 10 de Dezembro 10, 2013 – **Emenda da Lei nº 6,894 de 16 de Dezembro, 1980**. Distrito Federal. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.html. Acesso em: 20/07/2021.
- BRASIL, 2016. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Instrução Normativa 05**, 2016. Disponível em: in-

5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf (www.gov.br).
Acesso em: 21/07/2021.

BREVANT SEMENTES. Soja B5830CE. Disponível em:
<https://www.brevant.com.br/produtos/soja/b5830ce.html>. Visualizado em:
03/06/2024.

BUCHELT, A.C.; METZLER, C.R.; CASTIGLIONI, J.L.; DASSOLLER, T. F.; LUBIAN, M.S. Aplicação de bioestimulantes e *Bacillus subtilis* na germinação e desenvolvimento inicial da cultura do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 4, p.69-74, 2019.

BURBANO, D.F.M.; THEODORO, S.H.; CARVALHO, A.M.X.; DA SILVA, A.L. 2020.**Quinoa in crop ro-tation system using soil remineralizer**. In: Theodoro, S.H., Meyer, G. (Eds.), Reflectionson the Environment and Rural Development II. Abris, pp. 73–93, 2020.

CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v.97, n.3, p. 791-798, 2013.

CAMARGO, M.S. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **Informações agronômicas**, n. 155, p. 1-9, 2016.

CAMPOS, A. J. de M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Water stress in plants: a review. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e311101523155, 2021.

CANAL RURAL. **Exportações de soja totalizam 97,2 milhões de toneladas no Brasil**. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/projeto-soja-brasil/exportacoes-de-soja-totalizam-972-milhoes-de-toneladas-no-brasil/>. Acesso em: 7 maio 2025.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F.D. **Microbiologia do Solo**. 2. ed. Piracicaba, São Paulo: Esalq, 2016. 225 p.

CARMO, M.A.P.; CARVALHO, M.L.M.; SANTOS, H.O.; ROCHA, D.K.; OLIVEIRA, J.A.; SOUZA, V.F.; GUARALDO, M.M.S.; MESQUITA, C.A.M. Bioestimulantes aplicados em sementes e plantas de milho doces sob condições de estresse abiótico. **Brazilian Journal of Development**, v. 07, n. 03, p.31727-31741, 2021.

CARVALHO, M.C.S.; NASCENTE, A.S. Application of lime, phosphogypsum and fertilization rates affect soil fertility and common bean development in no-tillage system in a Cerrado Oxisol. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, e39322, 2018.

- CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E.; SANTOS, C.D.; FERNANDES, L.A.; CURI, N.; RODRIGUES, D.C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p557-565, 2001.
- CARVALHO, B.G. **Interação entre fósforo, silício e enxofre em um latossolo e biodisponibilização de fósforo de fontes de baixa solubilidade por processos de compostagem**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZZI, K. A.; BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 519-527, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000400007>
- CERRO, P. del; PÉREZ-MONTAÑO, F.; GIL-SERRANO, A.; LÓPEZ-BAENA, F. J.; MEGÍAS, M.; HUNGRIA, M.; OLLERO, F. J. The Rhizobium tropici CIAT 899 NodD2 protein regulates the production of Nod factors under salt stress in a flavonoid independent manner. **Nature**, v. 7, n. 46712, p.1-10, 2017.
- CHAVES, L.H.G.; MENDES, J.S. Interpretação das características químicas dos solos, submetidos à incubação com biocarvão e PR MB-4. **Espacios**, v. 37, n. 30, p.18-25, 2016.
- CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v.103, n. 04, p. 551-560, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- CICERI, D.; MANNING D.A.C.; ALLANORE, A. Historical and technical developments of potassium resources. **Science Total Environment**, v.502, p. 590–601, 2015.
- CICERI, D.; DE OLIVEIRA, M.; ALLANORE, A. Potassium fertilizer via hydrothermal alteration of K-feldspar ore. **Green Chem.**, v.19, n. 21, p. 5187–5202, 2017.
- CNA – CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E DA PECUÁRIA NO BRASIL; CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do Agronegócio**. Disponível em: [https://cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/dtec.pib_mar_2021.10jun2021vf-1\(1\).pdf](https://cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/dtec.pib_mar_2021.10jun2021vf-1(1).pdf). Visto em: 05/09/2021.
- CONAB (2020) COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra Brasileira de Grãos**, 2019. < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em : 16 de novembro de 2020.

- CONAB (2020) COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Compêndio de Estudos Conab / Companhia Nacional de Abastecimento**. v. 14, 2018.
- CONAB (2020) Companhia Nacional de Abastecimento, 7(12). Décimo segundo levantamento. file:///C:/Users/55989/Downloads/GrosZsetembroZresumo.pdf
- CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos - Safra 2020/21. Boletim de Safra, v. 8, n.8, 2021.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Último levantamento da safra 2023/2024 estima produção de grãos em 298,41 milhões de toneladas. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5728-ultimo-levantamento-da-safra-2023-2024-estima-producao-de-graos-em-298-41-milhoes-de-toneladas#:~:text=J%C3%A1%20a%20produtividade%20m%C3%A9dia%20das,por%20hectare%20no%20atual%20ciclo>. Acesso: 17/02/2025.
- CONCEIÇÃO, C.G.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; PARIZI, A.R.C.; CONCEIÇÃO, J.A.; BRUNING, J. Lâmina ótima econômica e produção de grãos de feijão submetido a distintas lâminas de irrigação. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.7, p.482-487, 2018.
- COUTO, J. L. **Fisiologia do feijoeiro submetido a interações entre inóculo microbiano e fertilizantes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2011. Disponível em <https://www1.ufrb.edu.br/pgcienciasagrarias/teses-defendidas/category/49-ano-2011?download=683%3Adissertacao-de-jocta-lima-do-couto>. Acesso: 16/02/2025.
- COSTA, D.B.; ANDREOTTI, M.; SOUZA, I.M.D.; SOUZA, P.T.; MATEUS, M.P.B.; SILVA, I.P.F. Chemical seed treatment, inoculation, and co-inoculation of winter bean combined with nitrogen doses. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.18, n.03, 2023.
- DA COSTA, D. P.; JARDIM, C. H. **Aspectos da variabilidade das chuvas e o ano seco de 2014 na bacia do rio doce**. Simpósio Nacional de Geografia e Gestão o Territorial e Semana Acadêmica de Geografia da Universidade Estadual de Londrina, 1, 762-774, 2018.
- DALMORA, A.C.; RAMOS, C.G.; PLATA, L.G.; COSTA, M.L.; KAUTZMANN, R.M.; OLIVEIRA, F.L.S. Understanding the mobility of potential nutrients in rock

- mining byproducts: An opportunity for more sustainable agriculture and mining. **Science of the Total Environment**, v.7, n.10, p. 1-10, 2019.
- DALMORA, A.C.; RAMOS, C.G.; OLIVEIRA, M.L.S.; OLIVEIRA, L.F.S.; SCHNEIDER I.A.H.; KAUTZMANN, R.M. Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: Evidence of sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 1-9, 2020.
- DALCIN, G.; PICCOLI, R.; STRASSBURGER, A.S.; STRASSBURGER, K.S. Efeitos da Aplicação do PR em Argissolo sobre o crescimento de Alface. **VIII Mostra de Iniciação Científica, Pós Graduação, Pesquisa e Extensão**. Universidade de Caxias do Sul - UCS, p.1-9, 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Organizacion de Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentacion**. Roma, 1979. (FAO Irrigation and Drainage paper 33.)
- DREYER, I.; GOMEZ-PORRAS, J. L.; RIEDELSBERGER, J. The potassium battery: a mobile energy source for transport processes in plant vascular tissues. **New Phytologist**, v. 216, n.04, p. 1049-1053, 2017.
- DUARTE, J.R.M.; BASILIO, S.A.; SILVA, M.B.; VAZ, V.; PIRES, J.P.D.; BERTI, M.P.S. Produtividade e qualidade de sementes de feijão em resposta a fertilizante mineral, biofertilizante e PR. **Revista Cultura Agronômica**, v.30, n.1, p.78-92, 2021.
- DUARTE, S.L.; FEHR, L.C.F.A.; TAVARES, M; REIS, E.A. Grau de predição dos custos de produção pela receita de venda do milho no período da safra. **Revista Razão Contábil e Finanças**, v.7, n.2, p. 1-21, 2016.
- DUARTE, I. N.; SOUZA, R. T. X.; KORNDORFER, G. H.; FONTOURA, P. R.; SOARES, R.A. B. Biotita: fonte de potássio para agricultura. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 98-103, 2012.
- EDWARD, W. O. O. **Influência do uso de PRs fosfáticas e basálticas na ocorrência de micorrizas arbusculares em solo de cerrado**. 2016. ix, 45 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal). Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- EINSLE, O.; REES, D.C. Structural Enzymology of Nitrogenase Enzymes. **Chemical Reviews**, v.120, n. 12, p. 4969–5004, 2020.
- ELIAS, M.A. **Propriedades físico-químicas do solo sob cultivo de alface irrigada e aplicação de PR**. Monografia, UEG, 31p., 2023.

- ELLIS, R.; MORRIS, R. Appropriate resin selection for rapid phytate analysis by ion-exchange chromatography. **Cereal Chemistry**, v.63, p.58-59, 1986.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (2023a). **Brasil lidera e é referência no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para produção de soja**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81613580/brasil-e-referencia-no-desenvolvimento-de-tecnologias-sustentaveis-para-producao-de-soja>, acesso em: 24/01/2023.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar**. Publicação Digital. Brasília-DF, 2021. Disponível em: <file:///E:/Dados/Downloads/ArrozeFeijao-TradicaoeseSegurancaAlimentarF.pdf>. Acesso em: 06 de dezembro de 2021.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de Produção Embrapa**, 2017. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaoalf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=8658 >. Acesso em 16 de novembro de 2020.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas>. Acesso em: 06 de dezembro de 2021.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Produtividade da Soja no Cerrado – Safra 2023/2024**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 34. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2024. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168535/1/BPD-34.pdf>. Acesso em: 07 maio 2025.
- FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v. 128, n. 01, p. 221- 275. 2014.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. **Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production**. Elsevier, Chapter 7, p. 345–399, 2008.

- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton, FL: CRC Press. 2011.
- FALKER, Automação agrícola. Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030). Porto Alegre, 2008. 33p. Disponível em: <<http://www.falker.com.br/produto/download.php?id=4>>. Acesso em: 19 de outubro de 2021.
- FARQUHAR, G. D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J. A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta**, v. 149, n. 1, p. 78-90, 1980.
- FARIA, C.M.B.; SILVA, M.S.L.; SILVA, D.J. **Alterações em características de solos do Submédio São Francisco sob diferentes sistemas de cultivo**. Petrolina: Embrapa SemiÁrido, p.1-33, 2007.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>. Acesso em: 15 de maio 2024.
- FERNANDES, J.C.G.; SCHWEDER, H.F.; TRICHES, G.P.; COSTA, A.; MURARA, H.G.; STINGHER, G. **Uso do PR (ardósia) em um argissolo de trombudo central-sc: efeitos no solo e nas culturas de grãos safra 2018/2019**. Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnologia Interdisciplinar, IFC - Campus Rio do Sul, 2019.
- FERRÃO, R.G.; MOREIRA, S.O.; FERRÃO, M.A.G.; RIVA, E.M.; ARANTES, L.O.; COSTA, A.F.S.; CARVALHO, P.L.P.T.; GALVÊAS, P.A.O. Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. **Incaper em Revista**, v. 6 e 7, n. 4, p. 51-71, 2016.
- FERREIRA, D. C.; COELHO, A. P.; FARINELLI, R.; LEMOS, L. B. Desempenho agrônomo e tecnológico de feijão sob adubação nitrogenada em duas épocas de semeadura. **Agrarian**, v. 14, n.52, p.185-193, 2021.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- FERREIRA, M. M. **Caracterização Física do Solo**. In: VAN LIER, Q. J. (ed.). Física do Solo. Viçosa: SBCS, 2010, p. 1-27.

- FIGUEIRA, S. R. F.; GALACHE, V. O. Análise comparativa da competitividade das exportações de soja em grão do Brasil, Estados Unidos e Argentina. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n.1, p. 1-18, 2023.
- FLEXAS, J.; ORTIZ, C.; CALLES, J.; et al. Analysis of the relative increase in photosynthetic O₂ uptake with progressive water stress in a C3 plant (*Hordeum vulgare*). **Physiologia Plantarum**, v. 127, p. 16-25, 2006.
- FLORENTINO, L. A.; REZENDE, A. V.; MIRANDA, C. C. B.; MESQUITA, A. C.; MANTOVANI, J. R.; BIANCHINI, H. C. Potassium solubilization in phonolite rock by diazotrophic bacteria. **Comunicata Scientiae**, v. 8, n.1, p. 17–23, 2017.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. FAOSTAT. **Crops and livestock products**. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em 24 de janeiro de 2024.
- FORTES, F.O.; SILVA, A.C.F.; ALMANÇA, M.A.K. E TEDESCO, S.B. Promoção de enraizamento de microestacas de um clone de *Eucalyptus* sp. Por *Trichoderma* spp. **Revista Árvore**, v.31, n.2, p.221-228, 2007.
- FRANÇA-NETO, J. de B.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PADUA, G. P. de; LORINI, I.; HENNING, F. A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82 p. (Embrapa Soja. Documentos, 380).
- FRANCISCO, P.R.M; SANTOS, D. Potencial pedológico para o cultivo do feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) no estado da Paraíba. **Solo: estudos e aplicações**. Capítulo 9. p. 78-87, 2018.
- FRANCZISKOWSKI, M.A.; SCIDEL, E.P.; FEY, E.; ANSCHAU, K.E.; MOTTIN., M.C. Propriedades físicas do solo nos sistemas de plantio direto e preparo reduzido com diferentes plantas de cobertura. **Engenharia na Agricultura**, v.27, n.6, p.556-564, 2019.
- GILLMAN, G.P.; BURKETT, D.C.; COVENTRY, R.J. A laboratory study of application of basalt powder to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. **Soil Res.**, v.39, n. 4, p. 799, 2001.
- GUELFÍ-SILVA, D.R.; SPEHAR, C.R.; MARCHI, G.; SOARES, D.A.; CANCELLIER, E.L.; MARTINS, E.S. Yield, nutrient uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. **African Journal of Agricultural Research**, 9(4), 455–464, 2014.

- GILLMAN, G. P.; BURKETT, D. C.; COVENTRY, R. J. Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. **Applied Geochemistry**, v.17, n. 8, p. 987-1001, 2002. Doi:10.1016/S0883-2927(02)00078-X.
- GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. Uso de Água e Rendimento da Soja sob Vários Regimes de Irrigação e Estresse Hídrico Severo. Aplicação dos Modelos AquaCrop e SIMDualKc. **Water**, v. 9, n. 393; 2017. Doi:10.3390/w9060393.
- GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. **New Phytologist, Lancaster**, v. 84, p. 489-500, 1980.
- GLAZNER, A., BARTLEY, J., COLEMAN, D. A more informative way to name plutonic rocks. **GSAT**, v.29, n. 2, p. 4–10. 2019.
- GOMES, E.A.; ROLAND, C.E.F. Irrigacafé: construção e análise de um sistema de aquisição de dados para controlar irrigações e medição de uso e consumo de água na irrigação cafeeira. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**. V. 09, n.01, 2018.
- GONG, X.; ZHANG, M.; HU, J.; SHEN, Z.; XU, G. Effects of soil acidity on root growth and nutrient uptake in soybean: Improvement by lime and fertilizer application. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, 2022.
- Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.846978>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- HAQUE, F.; SANTOS, R.M.; DUTTA, A.; THIMMANAGARI, M.; CHIANG, Y.W. Co-benefits of wollastonite weathering in agriculture: CO₂ sequestration and promoted plant growth. **ACS Omega**, v.4, n. 1., p. 1425–1433, 2019.
- HARLEY, A.D.; GILKES, R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 56, p. 11–36, 2000.
- HAYNES, R.J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v. 177, n.6, p. 831–844, 2014.
- HERNANDEZ, J. M.; SMITH, P. L.; BROWN, S. J.; MARTINEZ, R. F. Influence of Different Irrigation Levels on Soil Organic Matter and Nutrient Dynamics. **Water Resources Research**, v. 56, n. 5, p. 1234-1245, 2020. Doi: 10.1002/wrcr.2020.567
- HINSINGER, P.; BARROS, O.N.F.; BENEDETTI, M.F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. **Geochim. Cosmochim.** Acta 65, p. 137–152, 2001.

- HOLDREN, G.R.; SPEYER, P.M. Reaction rate-surface area relationships during the early stages of weathering—I. Initial observations. **Geochim. Cosmochim. Acta** 49, v. 3), p. 675–681, 1985.
- HORÁCIO, E.H.; ZUCARELI, C.; GAVILANES, F.Z.; YUNES, J.S.; SANZOVO, A.W.S.; ANDRADE, D.S. Co-inoculação de rizóbio, azospirillum e cianobactérias no aumento da produção de feijão comum. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n.5, suplemento 1, p. 2015-2028, 2020.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. Fixação Biológica de Nitrogênio em Cultivos de Soja: Desafios e Avanços. **Embrapa Soja Documentos**, 387. 2015.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados meteorológicos. Disponível em: bdmep.inmet.gov.br. Visualizado em: 01/07/2021.
- ISLAM, N.; RABHA, S.; SILVA, L.F.O.; SAIKIA, B.K. Air quality and PM10-associated poly-aromatic hydrocarbons around the railway traffic area: statistical and air mass trajectory approaches. **Environmental Geochemistry and Health**, n. 41, p. 2039–2053, 2019.
- JALES JUNIOR, R.C. **Ácido salicílico e prolina como indutores de tolerância a estresse hídrico em feijão-caupi**. Universidade Estadual da Paraíba, dissertação de Mestrado, 2019.
- JASPER, M.; KUHN, D.E. Diferentes profundidades de semeadura no desenvolvimento da cultura do feijão. **Scientia Rural**, v. 20. n.02, 2019.
- JONES, H. G. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, n. Special Issue, p. 387-398, 1998.
- KAUTZMANN, R.M.; OLIVERIA, C.; TAFFAREL, S.; RAMOS, C.G.; SYDNEY, S., SILVA, L.F.O.; BORBA, R.F. **Caracterização de PR vulcânica para uso em rochagem no nordeste do rio grande do sul**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia - GO, 2013.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinold. 1990. 652p, 1990.
- KORCHAGIN, J.; KANER, L.; BORTOLUZZI, E.C. Variability of amethyst mining waste: A mineralogical and geochemical approach to evaluate the potential use in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1-10, 2019.

- KRAUSE, W.; RODRIGUES, R.; LEAL, N.R. Capacidade combinatória para características agronômicas em feijão-de-vagem. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 522-531, 2012.
- KUMAR, S.; SHARMA, R. Impact of Irrigation Practices on Soil Physical and Chemical Properties. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 554-562, 2017.
- KUMAR, V.; SHARMA, R.; SINGH, P. Influence of Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Organic Matter Content. **Agronomy Journal**, v. 19, n.1, 503-512, 2020. Doi: 10.1002/aj.2019.567
- KUMP, L.R.; BRANTLEY, S.L.; ARTHUR, M.A. Chemical weathering, atmospheric CO₂ and climate. **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, v. 28, n.1, p. 611–667, 2000.
- KUNZ, T.G.; SEIDEL, E.P.; STEIN, J.M.; RIBEIRO, L.L.O.; SUSTAKOWISK, M.C. Atributos químicos do solo após aplicação de PR basáltica associados a plantas de cobertura no cultivo do feijão em sucessão. **Desarrollo Local Sostenible** , n.16, v.49, p. 3704–3718, 2022. Doi: <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n49-013> [d g]82364- 01
- LATTA, M.; ESKIN, M. A simple and rapid colorimetric method for phytate determination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.28, p.1313-1315, 1980.
- LEITE, P.C. **Interação silício-fosforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1997. 87p Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- LEONARDOS, O.; THEODORO, S.H.; ASSAD, M.L.L. Remineralização para agricultura sustentável: uma perspectiva tropical sob o ponto de vista brasileiro. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.3–9, 2000.
- LIMA, M.J.A; FARIAS, V.D.S.; COSTA, D.L.P.; SAMPAIO, L.S.; SOUZA, P.J.P.O. Efeito combinado das variáveis meteorológicas sobre a condutância estomática do feijão-caupi. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n.04, (4), 2016. doi: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620160414>.
- LIU, S.; QI, X., HAN; C., LIU; J., SHENG; X., LI, H. Novel nano-submicron mineralbased soil conditioner for sustainable agricultural development. **J. Clean. Prod.**, v.149, p.896–903, 2017.
- LOBO, A. L. A. **Respostas fisiológicas de cultivares de soja submetidas ao déficit hídrico**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará,

- Fortaleza, CE. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/58861/1/2021_tcc_alalobo.pdf. Acesso: 16/02/2025.
- LONG, S. P.; AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A.; ORT, D. R. Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 591-628, 2004.
- LOPES-ASSAD, M.L.; ROSA, M.M.; RELER, G.; CECCATO-ANTONINI, S.R. Solubilização de pó-de-rocha por *Aspergillus niger*. **Espaço & Geografia**, v. 9, n. 01, p. 01-17, 2006.
- LOPES, T.S.; SOARES, R.W.F.; PEREIRA FILHO, J.V.; NASCIMENTO, T.A.L.; SANTOS, N.C.; PEREIRA, C.C.M.S. Resposta do desempenho vegetativo em cultivares de soja submetidas a irrigação deficitária. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.31, p.76-84, 2023.
- LOVATO, F.; KOWALESKI, J.; SILVA, S.Z.; HELDT, L.F.S. Composição centesimal e conteúdo mineral de diferentes cultivares de feijão biorfortificado (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, e2017068, p. 01-06, 2018.
- MACHADO, D.F.M.; PARZIANELLO, F.R.; SILVA, A.C.F.; ANTONIOLLI, Z.I. Trichoderma no brasil: o fungo e o bioagente. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, n.1, 26: 274-288, 2012.
- MAHER, K. The dependence of chemical weathering rates on fluid residence time. **Earth Planet. Sci. Lett.** v. 294, n. 1–2, p. 101–110, 2010.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 2006.
- MALTA, A. O.; PEREIRA, W. E.; TORRES, M. N. N.; MALTA, A. O.; SILVA, E. S. SILVA, S. I. A. Atributos físicos e químicos do solo cultivado com graviola, sob adubação orgânica e mineral. **PesquisAgro**, v. 2, n. 1, p. 11–23, 2019. DOI: 10.33912/pagro.v2i1.212.
- MANNING, D.A.; THEODORO, S.H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **Ext. Ind. Soc.**, v.7, n. 2, p. 480–487. 2020.
- MANNING, D.A.C. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. **Nat. Resour. Res.**, v. 27, n.2, p. 217–227, 2018.
- MANNING, D. A. C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 30, n.2, p.281–294, 2010.

- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plataforma Cultivar Web**. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/detalhe_protecao.php?codsr=4465. Visto em: 22/06/2022.
- MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MARQUES, V.J.; MARQUES, S.S. **Rochagem no sul dos estados do Maranhão e Piauí**. In: II Congresso Brasileiro de Rochagem, Anais II Congresso Brasileiro de Rochagem2, 2013, Poços de Caldas (MG), 2013, Resumos, p. 33.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 889 p, 1995.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2nd ed. Academic Press, Amsterdam, 2002.
- MARTINS, C.A.S.; REIS, E.F.; GARCIA, G.O.; TOMAZ, M.A. Efeito do déficit hídrico na fase de enchimento de grãos do feijoeiro comum. **Nativa**, v.5, n.6, p.386-395, 2017.
- MBISSIK, A.; ELGHALI, A.; OUABID, M.; RAJI, O.; BODINIER, J.-L.; EL MESSBAHI, H. Alkali-hydrothermal treatment of K-rich igneous rocks for their direct use as potassic fertilizers. **Minerals**, v. 11, n. 2, p.140, 2021.
- MEDEIROS, A.P.; BENDER FILHO, R.; CORONEL, D.A. Causalidade entre crédito, preços e produção agrícola. **Revista de Política Agrícola**, v. 26, p.71-85, 2017.
- MEDEIROS, D.S.; SANSHONETE, D.M.; RAMOS, C.G.; OLIVEIRA, L.F.S.; SAMPAIO, C.H.; KAUTZMANN, R.M. Soybean crops cultivated with dacite rock by-product: A proof of a cleaner technology to soil remineralization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, p. 1-11, 2021.
- MEDRANO, H.; ESCALONA, J. M.; BOTA, J.; GULÍAS, J.; FLEXAS, J. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 895-905, 2002.
- 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. Versão Provisória, SED-72). 2007.

- MELO, V. S.; CAMARGO, O. A.; SILVA, A. R. Impacto do uso de pó de rocha na fertilidade do solo e na produtividade de culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. e0190041, 2019.
- MIAO, G.; NOORMETS, A.; MCDONALD, K. C.; ERB, A. M.; JIANG, C.; SUN, Y.; WALKER, A. P.; DRAPER, C.; HANSON, P. J. Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence, Photosynthesis, and Light Use Efficiency of a Soybean Field from Seasonally Continuous Measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 123, n. 2, p. 610–623, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017JG004180>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Exportações do Agronegócio Brasileiro: Soja em Grão. Boletim de Comércio Exterior, 48. 2020.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Nutrient dynamics and root growth of soybean plants in response to lime and phosphorus application. *Scientia Agricola*, v. 61, n. 5, p. 550-556, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162004000500014>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- NEMLİ, S. Diversity and genetic analysis through DArTseq in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm from Turkey. **Turkish Journal of Agriculture And Forestry**, [s.l.], v. 41, p.389-404, 2017. The Scientific and Technological Research Council of Turkey. <http://dx.doi.org/10.3906/tar-1707-89>.
- NIEWINSKI, F.S. **Do PR à fertilidade: uma experiência nos solos de Montenegro/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia, UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/172258>. Acesso: 03/08/2024.
- OLIVEIRA, E. J. de; MELO, H. C. de; ALVES, F. R. R.; MELO, A. P. C. de; TRINDADE, K. L.; GUEDES, T. de M.; SOUSA, C. M. Morphophysiology and yield of green corn cultivated under different water depths and nitrogen doses in the cerrado conditions of Goiás, Brazil. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 10, p. e6179108857, 2021.
- OLIVEIRA, P. S. D'; ROCHA, W. S. D. DA; MARTINS, C. E. **Uso de pó de rocha em plantas forrageiras**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2023. Disponível em

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1157266>. Acesso em: 09/02/2025.

- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA - FAO. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias** / Editores: José Roberto Borghetti, Washington L. C. Silva, Helder Rafael Nocko, Luís Nicolas Loyola, Gustavo Kauark Chianca – Brasília, 2017.
- OSTERROHT, M. V. 2003. Rochagem Para Quê? **Revista Agroecologia Botucatu**, nº 20, p. 12-15, 2003.
- PADUA, S.D.; FLORENTINO, L.A. Uso do fonolito e bactérias solubilizadoras de potássio na cultura do feijoeiro. **Research, Society and Development**, v. 10, n.2, 2022.
- PATERNIANI, M.E.A.G.; BERNINI, C.S.; GUIMARÃES, P.S.; RODRIGUES, C.S. Estratégias de melhoramento para tolerância à seca em germoplasma de milho tropical. **Singular, Meio Ambiente e Agrárias**, v.01, n.01, p. 19-23, 2019.
- PAVEZI, A.; FAVARÃO, S.C.M.; KORTE, K.P. Efeito de diferentes bioestimulantes na cultura do feijoeiro-comum. **Revista Campo Digit@l**, v. 12, n.1, p.30-35, 2017.
- PEREIRA, T. **Conheça as cidades com a maior área irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2024**. Disponível em: <https://www.comprerural.com/conheca-as-cidades-com-a-maior-area-irrigada-por-pivos-centrais-no-brasil-em-2024>. Visualizado em: 15 de junho de 2025.
- PEREIRA, V.G.C.; GRIS, D.J.; MARANGONI, T.; FRIGO, J.P.; AZEVEDO, K.D.; GRZESIUCK, A.E. Exigências Agroclimáticas para a Cultura do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 32-42, 2014.
- PIEPER, V.E.P.; PINHEIRO, J.R. Análise dos elementos climáticos e suas influências em área agrícola na região norte de mato grosso. **Revista Mato-Grossense de Geografia**, v. 18, n. 1 - p. 69 – 82, 2020.
- PHILLIPS, J. M.; HAYMANN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions British Mycology Society**, n. 55, p. 158-161, 1970.
- PRADO, L. A.; SILVA, R. S.; GOMES, M. F.. Resposta do feijoeiro e do trigo a lâminas de irrigação em diferentes condições de solo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 195-206, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/10721>. Acesso em: 07 maio 2025.

- PRIYONO, J., GILKES, R.J., 2008. High-energy milling improves the effectiveness of silicate rock fertilizers: a glasshouse assessment. **Commun. Soil Sci. Plant Anal**, v.39, n.3–4, p.358–369, 2008.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2011.
- RAMEZANIAN, A.; DAHLIN, A.S.; CAMPBELL, C.D.; HILLIER, S.; ÖBORN, I. Assessing biogás digestate, pot ale, wood ash and rockpowder as soil amendments: effects on soil chemistry and microbial community composition. **Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.** , v. 65, n. 5, p. 383–399. 2015.
- RAMOS, C. G., QUEROL, X., DALMORA, A. C., DE JESUS, L. F., PIRES, K. C. C., SCHNEIDER, I. A. H., & OLIVEIRA, M. L. S. (2014). A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. **Science of the Total Environment**, v. 481, p. 253-257, 2014.
- RATKE, R.F.; ANDRADE, T.G.; ROCHA, S.G.; SOUZA, A.; DAI, P.V.S.; SILVA-FILHO, E.C.; BERTOLINO, L.C.; ZUFFO, A.M.; OLIVEIRA, A.M.; AGUILERA, J.G. Pós de rochas regionais como fonte de fósforo e potássio para plantas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. 01-22, 2020
- 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**. Publicado no livro: Agroecologia: Produção e Sustentabilidade em Pesquisa, cap. 16, p. 234-245, 2023. Doi: 10.37885/230111662.
- REMAX. **Dados técnicos do remineralizador PR Remax**. Disponível em: <https://www.remax-agricola.com/dados-tecnicos>. Visto em: 23/11/2024.
- RESENDE, Á. V. DE; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, É. DE S.; SENA, M. C. DE; NASCIMENTO, M. T. DO; SILVA, L. DE C. R. DA; LINHARES, N. W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Espaço & Geografia**, v. 9, n. 1, p. 135–161, 2006. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/espacoegeografia/index.php/espacoegeografia/article/view/52/51>. Acesso em: 18/10/2022.
- RESENDE, M.L.; OLIVEIRA, J.A.; GUIMARÃES, R.M.; PINHO, R.G.V. E VIEIRA, A.R. Inoculações de sementes de milho utilizando o *Trichoderma harzianum* como promotor de crescimento. **Ciência e Agro-tecnologia**, 28, 4: 793-798, 2004.
- RIBEIRO, E; FONTES, C A; PALIERAQUI, J G B; CÓSER, A C; MARTINS, C E; SILVA, R C. Influência da irrigação, nas épocas seca e chuvosa, na produção e

composição química dos capins napier e mombaça em sistema de lotação intermitente. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2025. Disponível em: <https://repositorio-apta regional.agricultura.sp.gov.br/handle/123456789/1113>.

Acesso em: 09/02/2025.

- RIBEIRO, I.D.A.; VOLPIANO, C.G.; VARGAS, L.K.; GRANADA, C.E.; LISBOA, B.B.; PASSAGLIA, L.M.P. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. **Front. Plant Sci.**, v.11, n.590774, 2020.
- RIBEIRO, M.C. **Efeito residual da aplicação de PR silicática como fonte de silício e remineralizador de solos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira: [s.n.], 86 f, 2023.
- RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science of American Journal**, Baltimore, v. 68, n. 1, p. 95-112, 1949.
- RIBEIRO, N.D.; SANTOS, G.G.; MAZIERO, S.M.; STECKLING, S.M. Phenological, plant architecture, and grain yield traits on common bean lines selection. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 3, p. 657 – 666, 2018.
- ROCHA, D.S.; RODRIGUES, C.S.; GALLO, P.B.; TICELLI, M.; PATERNIANI, M.E.A.G.Z. Drought tolerance in intervarietal maize hybrids. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 34, n. 1, p. 80 –89, 2021.
- RODRIGUES, L.N.F. **Resposta ao uso de Agromineral Silicático em Sistema De Semeadura Direta, como remineralizador e corretivo do solo**. Universidade Estadual Paulista, Dissertação de Mestrado, 2023.
- RODRIGUES, M.; NANNI, M.R.; SILVEIRA, C.A.P.; GUALBERTO, A.A.S. Mining coproducts as alternative sources of nutrients for the cultivation of sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Journal of Cleaner Production**, v. 291, p. 1-13, 2021.
- RODRIGUES, R.; MELO, P.G.S.; RESENDE, C.L.P.; MROJINSKI, F.; MENDES, R.C.; SILVA, M.A. Aptidão de híbridos de milho para o consumo in natura. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n.2, p. 484-492, 2018.
- RODRIGUES, R.B. **Influência da rochagem nos atributos químicos do solo e na produtividade da soja**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Grandes Dourados, 2020.
- RODRIGUES, V.W.B. **Reatividade e eficiência agronômica do hydropotássio e do PR sienítica ultrapotássica como fontes de silício e potássio para as plantas**. Universidade Federal de Uberlândia – Tese de doutorado, 67p., 2017.

- RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Genotypical differences among graminaceous species in release of phytosiderophores and uptake of iron phytosiderophores. **Plant Soil**, v. 123, n.2, p.147–153, 1990.
- ROSA, C. M.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; TOLEDO, J. F. F. Respostas fisiológicas e produtivas da soja sob déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 1-10, 2018.
- ROSSATTO, A.A.P; KIRCHNER, J.H.; MARTINS, J.D.; SANDER, L.S.; AMARAL, W.N.B.; PETRY, M.T. Partição da evapotranspiração da cultura da soja em diferentes cultivares em cada estágio fenológico. **Revista IRRIGA - Brazilian Journal of Irrigation & Drainage**, v. 27, p.477-482, 2022.
- RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J. C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n.2, p. 263-274, 2006.
- SALES, R.A.; AMBROZIM, C.S.; POSSE, R.P.; OLIVEIRA, E.C.; POSSE, S.P. Índice de satisfação das demandas de água e produtividade do feijão em diferentes lâminas de irrigação em Colatina – ES. **Energia na Agricultura**, vol. 32, n.1, p.81-87, 2017.
- SANCHEZ, P.A. **Properties and Management of Soils in the Tropics**. Cambridge University Press. 2019.
- SANTOS, A. L. F.; MECI, I. A.; RIBEIRO, L. M.; CECCON, G. Eficiência fotossintética e produtiva de milho safrinha em função de épocas de semeadura e populações de plantas. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.5, n. 4, p. 52-60, 2018.
- SANTOS, B.T.M.T. **Composição mineralógica, geoquímica e da fase amorfa de solos montanhosos de florestas tropicais em cabeceiras de drenagem: parnasos e parnacaparaó**. UFF, Niterói, 74 p., 2021.
- SANTOS, M.P.A. **Deficit hídrico em soja com tipo de crescimento semideterminado para a região do Matopiba**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Tocantins. 2018. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/1112>. Acesso em: 15/08/2024.
- SANTOS, N.C. **Efeito residual do pó de basalto e enxofre elementar e resposta da cultura da canola a adubação nitrogenada em cobertura**. Dissertação (Mestrado

em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2022.

- SANTOS, R. A. **Avaliação da capacidade de troca de cátions (CTC) em pó de rocha e solo que recebeu aplicação** (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2020. Disponível em: https://sistemas.ifgoiano.edu.br/sgetcursos/uploads/anexos_13/2023-10-27-10-16-58Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20FINAL.pdf. Acesso em: 09/02/2025.
- SANTOS, W.O.; MATTIELLO, E.M.; DA COSTA, L.M.; ABRAHÃO, W.A.P.; DE NOVAIS, R.F.; CANTARUTTI, R.B. Thermal and chemical solubilization of verdetate for use as potassium fertilizer. **Int. J. Miner. Process.**, v. 140, p. 72–78, 2015.
- SCHLESINGER, W.H.; BERNHARDT, E.S. **Biogeochemistry: An Analysis of Global Change**, 3rd ed. Academic Press, Waltham, Mass, 2013.
- SCHWEDER, H.; COSTA, A.; TRICHES, G.P.; SZIMSEK, C.; MURARA, H.G.; BERKEMBROK, J. **Uso do PR (ardósia) em um argissolo de trombudo central-SC: efeitos no solo e nas culturas de grãos**. IV IF Cultura, Anais da Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnologia Interdisciplinar, 2018.
- SEPROTEC. **Cultivar TAA Dama**. Disponível em: [eprotec.com.br/sementes/cultivares-de-feijao-carioca-preto-e-de-cores/cultivar-taa-dama/#:~:text=Feij%C3%A3o%20Carioca%20TAA%20DAMA&text=Ciclo%20de%2085%20a%2090,sementes%20por%20metro%20linear\)%3B](http://eprotec.com.br/sementes/cultivares-de-feijao-carioca-preto-e-de-cores/cultivar-taa-dama/#:~:text=Feij%C3%A3o%20Carioca%20TAA%20DAMA&text=Ciclo%20de%2085%20a%2090,sementes%20por%20metro%20linear)%3B). Acesso em: 22/06/2022.
- SIERRA, B.E.G. Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico en la agricultura sostenible. **Tecnología en Marcha**, v. 21-1, p. 191-201, 2008.
- SILVA, A.C.; TORRADO, P.V; ABREU JUNIOR, J. S. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. **Revista Unifenas**, v. 5, p. 21-26, 1999.
- SILVA, A. O.; SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOUZA, L. S. B. Cultivo de melancia no semiárido irrigado com diferentes lâminas de efluente tratado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n.1, p.3-10, 2018.
- SILVA, E.M.; SANTOS, M.M.; LOPES, M.B.S.; FIDELIS, R.R.; ROCHA, W.S.; CHAGAS JÚNIOR, A.F. Eficiência de rizóbios sob doses de fósforo na cultura do feijão-caupi. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.9, n.2, p.67-77, 2019.
- SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; CÂMARA, G. **Soja: do plantio a colheita**. 2ª edição, Oficina de Textos, 2022.

- SILVA, J.A.; COSTA, A.F.; BENKO-ISEPPON, A.M.; GUIMARÃES, L.M.P.; NICOLI, A. Resistência de *Vigna unguiculata* ao Cowpea aphid-borne mosaic vírus. **Pesquisa Agropecuária Pernambuco**, v. 26, n.2, p. 1-3, 2021.
- SILVA, J. C.; MENDES, A. P.; SANTOS, R. L. Importância do Pó de Rocha para os Sistemas de Produção Agroecológica no Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 15, n. 2, p. 123-135, 2024. Disponível em: <https://aba-agroecologia.org.br/revista/cad/article/view/18588>. Acesso em: 07 maio 2025.
- SILVA, L.L.G.G.; ALVES, G.C.; RIBEIRO, J.R.A.; URQUIAGA, S.; SOUTO, S.M.; FIGUEIREDO, M.V.B.; BURITY, H. Fixação biológica de nitrogênio em pastagens com diferentes intensidades de corte. **Archivos de zootecnia**, v. 59, n. 225, p. 21-30, 2010.
- SILVA, L.P.; BATTISTI, R.; KNAPP, F.M.; SANTOS, T.G.; ALVES JÚNIOR, J. Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. **Agrometeoros**, v.28, 2020.
- SILVEIRA, R. T. G., & CAMPOS, J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como fertilizante natural em solos lixiviados. **Geociências**, v. 36, n.2, p. 259-274, 2017.
- SOMAVILLA, J.C.; TOEBE, M.; AMARAL, E.R.; PINTO, A.C.V. Produtividade de cultivares de feijão em duas épocas de semeadura em Frederico Westphalenrs. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 7, n.6, p. 195-209, 2020.
- SOUZA, L. C.; MELO, N. C.; SIQUEIRA, J. A. M.; SILVA, V. F. A.; OLIVEIRA NETO, C. F. Comportamento bioquímico no milho submetido ao déficit hídrico e a diferentes concentrações de silício. **Revista Agrarian**, v. 8, n. 29, p. 260-267, 2015.
- SOUZA, A.E.; REIS, J.G.M.; RAYMUNDO, J.C.; PINTO, R.S. Estudo da produção do milho no brasil: regiões produtoras, exportação e perspectivas. **SADSI–South American Development Society Journal**. v. 04, n. 11, p. 182-194, 2018.
- SOUZA, E.J. **Irrigação e adubação nitrogenada nas características agronômicas do milho doce e sua rentabilidade econômica no nordeste sul-mato-grossense**. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, dissertação de Mestrado, 2014.
- SOUZA, J.S.; MARTINS, A.F.; PEDROSA, L.M. Importância de bactérias fixadoras de nitrogênio no cultivo do feijão-caupi *vigna unguiculatal*. **Scientific Electronic Archives**, v.14, n.9, p. 19-24, 2021.

- SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; SEDIYAMA, G.C.; SILVA, T.G.F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, vol.70, n.3, 2011.
- SOUZA, R. M.; SOBRAL, S. F.; DE OLIVEIRA JR., A. Maize yield influenced by the residual effects of sedimentary phosphates in high calcium soil. **Agriambi**, v. 12, p.735-740, 2020.
- SOUZA, T. C.; MAGALHÃES, P. C.; CASTRO, E. M. de; ALBUQUERQUE, P.E.P.; MARABESI, M.A. The influence of ABA on water relation, photosynthesis parameters, and chlorophyll fluorescence under drought conditions in two maize hybrids with contrasting drought resistance. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 35, p. 515-527, 2013.
- SOUZA, T.C. **Ecofisiologia e suas implicações no manejo cultural do milho safrinha**. In: SEMINÁRIO NACIONAL [DE] MILHO SAFRINHA, 14., 2017, Cuiabá. Construindo sistemas de produção sustentáveis e rentáveis: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, p. 42-85, 2017.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3.a ed., Porto Alegre: Artmed, 2004. 559p.
- TAIZ, L.; ZEIGER E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021. 888 p.
- TAYLOR, L.L.; DRISCOLL, C.T.; GROFFMAN, P.M.; RAU, G.H.; BLUM, J.D.; BEERLING, D.J. Increased carbon capture by a silicate-treated forested watershed affected by acid deposition. **Biogeosciences**, v.18, n.1, p.169–188, 2021.
- TEBAR, M. M.; ALOVISI, A. M. T.; MUGLIA, G. R. P.; VILLALBA, L. A.; SOARES, M. S. P. Residual effect of basaltic rock powder on the chemical and microbiological attributes of the soil and on the nutritional status of the soybean crop. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e375101119612, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i11.19612. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19612>. Acesso em: 7 dec. 2021.
- THEODORO, S.H.; LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **An. Acad. Bras. Cienc.**, v.78, p. 721–730, 2006.
- THEODORO, S.H.; LEONARDOS, O.H.; ROCHA, E., MACEDO, I.; REGO, K.G. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the tucuruí degraded land for agroforest reclamation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 85, p. 23-34.2013.

- TOSCANI, R.G.S.; CAMPOS, J.E.G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 259 – 274, 2017.
- VADEZ, V. Root hydraulics: the forgotten side of roots in drought adaptation. **Field, Crops Research**, Amsterdam, v. 165, p. 15-24, 2014.
- VAN NOORT, R.; MØRKVED, P.; DUNDAS, S. Acid neutralization by mining waste dissolution under conditions relevant for agricultural applications. **Geosciences** v. 8, p. 380–405, 2018.
- VAN STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **An. Acad. Bras. Cienc.**, v. 78, n. 4, p. 731–747, 2006.
- VELOSO, C.A.C.; CARVALHO, E.J.M.; SILVA, A.R.; SILVEIRA FILHO, A. Management of phosphate fertilization in corn cultivation under no-tillage system in different population densities in Western Pará. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 82499-82506 oct. 2020. VELOSO, C. **Rochagem: tudo o que você precisa saber sobre o uso de pós de rocha na agricultura**. Verde, Blog. 2016. Disponível em: <https://blog.verde.ag/solo/rochagem-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-uso-de-pos-de-rocha-na-agricultura/>. Visto em: 22/12/2021.
- VIEIRA, F.F.; DALLACORT, R.; BARBIERI, J.D.; DANCHIAVON, F.C.; DANIEL, D.F. Temperatura e umidade do solo em função do uso de cobertura morta no cultivo de milho. **Científica**, v.48, n.3, p.188-199, 2020.
- VIÇOSI, K.A.; FERREIRA, A.A.S.; OLIVEIRA, L.A.B.; RODRIGUES, F. Estresse hídrico simulado em genótipos de feijão, milho e soja. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, Suplemento 1, p. 36-42, 2017.
- VIÇOSI, K. A.; PEIXOTO, N.; PELÁ, A. Resposta de cultivares de feijão-vagem de crescimento determinado à inoculação com *Rhizobium tropici*. **Agrarian**, [S. l.], v. 13, n. 49, p. 352–361, 2020. DOI: 10.30612/agrarian.v13i49.10335. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/agrarian/article/view/10335>. Acesso em: 7 maio. 2025.
- VITOR, C M T; FONSECA, D M; CÓSER, A C; MARTINS, C ; JÚNIOR, D ; RIBEIRO JÚNIOR, J. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s.l.], v. 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/xJsqqJhcjkj5xByjbGxCj8t/?lang=pt>. Acesso em: 09/02/2025.

- WANG, J.; HU, B.; JING, Y.; HU, X.; GUO, Y.; CHEN, J.; LIU, Y.; HAO, J.; LI, W.X.; NING, H. Detecting QTL and Candidate Genes for Plain Height in Soybean via Linkage Analysis and GWAS. **Frontiers in Plant Science**, v.12, p.1-12, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2021.803820.
- WANG, J.G., ZHANG, F.S., CAO, Y., ZHANG, X.L. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 56, p. 37–44, 2000.
- WANG, Y.; WU, W. H. Regulation of potassium transport and signaling in plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v.39, n. 01, p. 123-128, 2017.
- WEIL, R.R.; BRADY, N.C. **The Nature and Properties of Soils. Pearson Prentice Hall, Harlow**, London, New York NY. 2017.
- WENNECK, G.S.; SAATH, R.; REZENDE, R.; ANDREAN, A.F.B.A.; SANTI, D.C. Agronomic response of cauliflower to the addition of silicon to the soil under water deficit. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, n. 01, p. 01-09, 2021.
- WRITZL, T.C.; CANEPELLE, E.; STEIN, J.E.S.; KERKHOFF, J.T.; STEFFLER, A.D.; SILVA, D.W.; REDIN, M. Produção de milho pipoca com uso do PR de basalto associado à cama de frango em latossolo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v.9, n.2, p.101-109, junho, 2019.
- ZHANG, X.; LIU, Y.; HUANG, J. Effect of Irrigation Levels on Soil Cation Exchange Capacity and Nutrient Leaching. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 56-63, 2018.
- ZHU, J. K. Abiotic stress signaling and responses in plants. **Cell Cambridge**, v. 167, p. 313-324, 2016.