

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**A calagem afeta fatores morfofisiológicos determinantes para o aumento da
produtividade da soja em solo ácido do Cerrado**

Gisele Gomes Parnaíba Lopes
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

GISELE GOMES PARNAIBA LOPES

**A calagem afeta fatores morfofisiológicos determinantes para o aumento da
produtividade da soja em solo ácido do Cerrado**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Cleberson Ribeiro

Coorientadores: Maximiller D. B. L. Costa
Aristea Alves Azevedo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L864c
2025

Lopes, Gisele Gomes Parnaíba, 2000-
A calagem afeta fatores morfofisiológicos determinantes
para o aumento da produtividade da soja em solo ácido do
Cerrado / Gisele Gomes Parnaíba Lopes. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (56 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Cleberson Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Biologia Vegetal, 2025.

Referências bibliográficas: f. 36-43.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.652>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Fisiologia - Efeito da acidez do solo. 2. Calagem
dos solos. I. Ribeiro, Cleberson, 1980-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Biologia Vegetal. Programa de
Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal. III. Título.

CDD 22. ed. 633.34

GISELE GOMES PARNAIBA LOPES

A calagem afeta fatores morfofisiológicos determinantes para o aumento da produtividade da soja em solo ácido do Cerrado

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 3 de julho de 2025.

Assentimento:

Gisele Gomes Parnaíba Lopes
Autora

Cleberson Ribeiro
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 13/10/2025 às 22:06:18 e pelo orientador em 22/10/2025 às 10:50:25. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **TX3M.6SBM.L9AT** e clique no botão 'Validar documento'.

À minha família, meu tudo, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus e ao Divino Espírito Santo, pelo amparo e fortaleza até aqui. Ai de mim, se não fosse Vosso consolo.

Aos meus pais, Rogério e Terezinha (Elma), pelo apoio manifestado em palavras, gestos e por todo amor. Ao meu irmão, Saulo, pelo carinho, pelas constantes atualizações sobre nossos gatos e nosso cachorro. Aos meus avós maternos, Francisco (vô Chico) e Josefa (vó Zefa) e paternos, vô Pedro e vó Maria (in memoriam) pelo incentivo e os exemplos de vida. E ao meu namorado, Erick, pelo amor, companheirismos, apoio e paciência. Vocês são a minha força, inspiração e motivação.

Aos colegas do Laboratório de Genética Molecular de Plantas (LGMP), em especial Elen Ximenes, pela receptividade e por todos os ensinamentos acadêmicos e de vida; Amanda Tavares, pela amizade e acompanhamento nos experimentos; Thaís Vida e Marina Gonçalves, pelas contribuições em especial nas análises enzimáticas; Pedro Saturno, pela ajuda no desmonte do experimento. Gratidão a todos vocês.

Agradeço também ao colega Clayton Ferreira, pelas contribuições na fase inicial deste projeto e pelas boas conversas. À David Medeiros, gratidão por toda assistência desde a graduação, pela disponibilidade para realização das análises e pelo incentivo para que eu prestasse seleção para este programa de pós-graduação. Ao meu orientador, Cleberson Ribeiro e aos coorientadores, Maxmiller Dal-Bianco e Aristéa Alves de Azevedo, pelas contribuições ao longo da construção desta dissertação. E à banca avaliadora, pelo aceite e valiosas considerações para o enriquecimento deste trabalho.

À Unidade de Crescimento de Plantas (UCP), na pessoa do professor Wagner Araújo; ao Laboratório de Anatomia Vegetal do Departamento de Biologia Vegetal, na pessoa da professora Aristéa e à João Santana pela assistência nas análises; e ao Núcleo de Microscopia e Microanálise, especialmente à Karla Gonçalves. Por fornecerem a assistência e estrutura para a realização das análises, deixo registrado meu agradecimento.

Gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade. Ao Instituto de Biotecnologia Aplicada a Agropecuária (Bioagro) e ao LGMP pelo suporte e infraestrutura fornecidos ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“In consiliis nostris fatum nostrum est.”
(O labirinto do Fauno)

RESUMO

LOPES, Gisele Gomes Parnaíba, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **A calagem afeta fatores morfofisiológicos determinantes para o aumento da produtividade da soja em solo ácido do Cerrado.** Orientador: Cleberson Ribeiro. Coorientadores: Maximiller Dal Bianco Lamas Costa e Aristeia Alves Azevedo.

O pH do solo é uma das propriedades químicas mais importantes e limitantes para o desenvolvimento de culturas agrícolas no mundo. No Brasil, cerca de 75% das áreas potencialmente agricultáveis são assoladas por problemas relacionados à acidez do solo ($\text{pH} < 5,5$). O baixo pH implica diretamente em diversos processos do solo, como menor atividade microbiana, redução da fertilidade e aumento na solubilização de metais pesados. Para corrigir a acidez do solo e aumentar a produtividade, é comum o uso da calagem. A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é considerada uma das leguminosas mais importantes para a segurança alimentar global, com áreas de cultivo em constante expansão no Cerrado brasileiro, região caracterizada predominantemente por solos ácidos e de baixa fertilidade. Embora a calagem seja uma prática de manejo bem-sucedida, ainda há lacunas na compreensão sobre a modulação de parâmetros fisiológicos das plantas, especialmente da soja, e de que forma isso se reflete em ganhos produtivos. Assim, objetivou-se avaliar os parâmetros morfofisiológicos e metabólicos durante os estágios vegetativo e reprodutivo de *G. max* cultivada em solo sem e com correção da acidez, bem como os impactos sobre a produtividade. As plantas foram cultivadas em casa de vegetação em vasos com solo de Cerrado submetidos à calagem (L) e sem calagem (NL). Foram realizadas análises morfofisiológicas e metabólicas nos estágios V3 e R5, além de avaliações de produtividade e qualidade dos grãos no estágio R8. A calagem alterou as propriedades químicas do solo, elevando o pH e a concentração de macro e micronutrientes e reduziu a concentração de Al. Plantas L obtiveram melhores parâmetros morfológicos e maiores acúmulos de nutrientes essenciais, resultando em maior crescimento. Já os ápices radiculares mostraram maiores danos externos nas plantas do tratamento NL. As concentrações de clorofila *b*, carotenoides e a taxa de fotossíntese líquida foram menores nas plantas L; contudo, a transferência de energia e a eficiência do PSII foram superiores no estágio reprodutivo. A calagem também influenciou o metabolismo de carboidratos, promovendo aumento nos teores de frutose no tratamento L. A acidez modulou o status redox principalmente nas raízes de soja submetidas à calagem, com maiores atividades de SOD e POX, além de redução na peroxidação lipídica e na produção de H_2O_2 . O tratamento L ainda elevou a produtividade e o teor

de proteínas nos grãos. A Análise de Componentes Principais (PCA) evidenciou maior contribuição das variáveis de macronutrientes, NPQ, frutose e massa seca, para a parte aérea e, massa seca, P, K, Ca, Fe, Al e SOD para as raízes das plantas do tratamento L no estágio vegetativo. Já no reprodutivo, houve maior contribuição do Mg, ETR e Φ PSII e produtividade para a parte aérea, enquanto a nodulação e atividade da SOD foram correlacionadas positivamente com as raízes nesse mesmo tratamento. Em conclusão, a calagem promoveu melhorias fenotípicas nos órgãos vegetativos e maior qualidade nutricional, desencadeando respostas metabólicas e enzimáticas mais eficientes e, por fim, levando a maior produção de grãos e proteínas.

Palavras-chave: acidez; calagem; *Glycine max*; latossolo; produtividade

ABSTRACT

LOPES, Gisele Gomes Parnaíba, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025.
Liming influences key morphophysiological factors driving soybean yield improvement in acidic Cerrado soils. Adviser: Cleberson Ribeiro. Co-advisers: Maximiller Dal Bianco Lamas Costa and Aristeia Alves Azevedo.

Soil pH is one of the most important and limiting chemical properties for the development of agricultural crops worldwide. In Brazil, about 75% of potentially arable land is affected by problems related to soil acidity ($\text{pH} < 5.5$). Low pH directly impacts several soil processes, such as reduced microbial activity, decreased fertility, and increased solubilization of heavy metals. To correct soil acidity and improve productivity, liming is commonly applied. Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is considered one of the most important legumes for global food security, with cultivation areas continuously expanding in the Brazilian Cerrado, a region predominantly characterized by acidic and low-fertility soils. Although liming is a well-established management practice, there are still gaps in understanding how it modulates plant physiological parameters, especially in soybean, and how this translates into yield gains. Thus, the objective of this study was to evaluate morphophysiological and metabolic parameters during the vegetative and reproductive stages of *G. max* grown in soil with and without acidity correction, as well as the impacts on yield. Plants were cultivated in a greenhouse in pots with Cerrado soil subjected to liming (L) and without liming (NL). Morphophysiological and metabolic analyses were performed at the V3 and R5 stages, and yield and grain quality were assessed at the R8 stage. Liming altered soil chemical properties, increasing pH and macro- and micronutrient concentrations while reducing Al content. L plants exhibited better morphological traits and greater accumulation of essential nutrients, resulting in enhanced growth. Root apices showed more severe external damage in NL plants. Chlorophyll *b* concentration, carotenoid content, and net photosynthetic rate were lower in L plants; however, energy transfer and PSII efficiency were higher at the reproductive stage. Liming also influenced carbohydrate metabolism, promoting an increase in fructose content in the L treatment. Soil acidity modulated the redox status mainly in soybean roots under liming, with higher SOD and POX activities, along with reduced lipid peroxidation and H_2O_2 production. The L treatment also increased yield and protein content in grains. Principal Component Analysis (PCA) revealed greater contributions of macronutrients, NPQ, fructose, and shoot dry mass, as well as root dry mass, P, K, Ca, Fe, Al, and SOD activity in L plants during the vegetative stage. In the reproductive stage, Mg, ETR, ?PSII, and yield

contributed more to the shoots, while nodulation and SOD activity were positively correlated with the roots in the same treatment. In conclusion, liming promoted phenotypic improvements in vegetative organs and enhanced nutritional quality, triggering more efficient metabolic and enzymatic responses and ultimately leading to higher grain and protein production.

Keywords: acidity; liming; *Glycine max*; oxisol; productivity

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1 Condições de cultivo e material vegetal	15
2.2 Avaliações morfométricas e nutricionais	16
2.3 Avaliação da morfologia externa da raiz por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	16
2.4 Trocas gasosas	17
2.5 Metabolismo primário	17
2.5.1 Pigmentos totais	18
2.5.2 Concentração de açúcares	18
2.5.3 Concentração de amido	18
2.5.4 Aminoácidos totais	19
2.5.5 Proteínas totais	19
2.6 Atividade enzimática do sistema antioxidante	19
2.6.1 Atividade da peroxidase total (POX, EC 1.11.1.7)	20
2.6.2 Atividade da ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)	20
2.6.3 Atividade da superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)	20
2.7 Peroxidação lipídica	20
2.8 Peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂)	21
2.9 Ânion Superóxido	21
2.10 Rendimento produtivo e quantidade de óleo e proteínas do grão	22
2.11 Delineamento experimental e análise estatística	22
3. RESULTADOS	23
3.1 A calagem altera as propriedades químicas do solo	23
3.2 Calagem afeta as características morfológicas e nutricionais da soja	23
3.3 Calagem modula a morfologia externa de ápices radiculares	24
3.4 Eficiência fotossintética é pouco afetada pela acidez do solo	25
3.5 Concentração de carboidratos é influenciada pela calagem	25
3.6 Acidez do solo modula o <i>status redox</i> em raízes de soja	26
3.7 Calagem impacta positivamente sobre a produtividade e aumenta a qualidade dos grãos da soja	26

3.8 Análise de componentes principais mostra separação entre os tratamentos	
.....	26
4. DISCUSSÃO	27
5. CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS	36
LISTA DE TABELAS E FIGURAS	44

1. INTRODUÇÃO

O pH do solo é uma das propriedades químicas mais relevantes e, ao mesmo tempo, limitantes para o desenvolvimento das culturas agrícolas em todo o mundo (FAGERIA; BALIGAR, 2008; AGEgneHU et al., 2021). No Brasil, aproximadamente 75% das áreas potencialmente agricultáveis apresentam problemas relacionados à acidez ($\text{pH} < 5,5$), condição predominante em Latossolos e Argissolos (FAGERIA; NASCENTE, 2014; ALVES et al., 2021). O Cerrado, importante bioma brasileiro, é constituído majoritariamente por esses solos, que se destacam pela elevada saturação de Al, alta capacidade de fixação de P, ou seja, pela forte retenção do fósforo nos coloides, reduzindo sua disponibilidade às plantas, e baixa fertilidade natural (FAGERIA; BALIGAR, 2008).

O baixo pH implica diretamente em diversos processos do solo, como a redução da atividade microbiana, fertilidade e solubilização de metais pesados (BOLAN; ADRIANO; CURTIN, 2003; MENG *et al.*, 2019). A saturação de H^+ reduz a capacidade tamponante do solo, uma vez que os íons competem com cátions básicos, como Mg^{2+} e Ca^{2+} , promovendo a lixiviação de nutrientes (MENG *et al.*, 2019). Associado a isso, elementos metálicos essenciais, como o Fe e Mn, e não essenciais, como Al, tornam-se disponíveis em maiores concentrações, podendo desencadear efeitos tóxicos (MENG *et al.*, 2019; MINATO *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2023).

A toxicidade do alumínio é um fator indissociável da acidez, sendo este um dos principais elementos que restringe o crescimento das plantas em solos ácidos (BIAN *et al.*, 2013; BRITO *et al.*, 2020). Quando biodisponível, o Al pode permanecer ligado às paredes celulares ou ser absorvido pelas células radiculares, onde induz alterações estruturais e fisiológicas, que prejudicam o alongamento celular e absorção de nutrientes (ČIAMPOROVÁ, 2002). Esses danos, por sua vez, podem causar desbalanços nutricionais, como deficiência de macro e micronutrientes essenciais.

O *status* nutricional, que inclui a presença e a distribuição de nutrientes, é fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas (EL AMRANI, 2024). Em condições subótimas, como deficiência de macronutrientes, em função do menor pH do solo, ocorre disfunção em diversos processos metabólicos, como regulação osmótica, sinalização celular, ativação enzimática e fotossíntese, que são essenciais para o desenvolvimento vegetal (KIRKBY, 2012; SINGH; REDDY, 2017; PODAR; MAATHUIS, 2022).

Para corrigir a acidez do solo e elevar o ganho produtivo, é comum o uso da calagem, que consiste na aplicação de materiais ricos em cálcio e magnésio (AGEGNEHU *et al.*, 2021; BOSSOLANI *et al.*, 2021b). A aplicação de calcário em solos ácidos proporciona a elevação do pH, ao mesmo tempo em que aumenta a disponibilidade de elementos essenciais, reduz a lixiviação, favorece a fixação biológica de N e neutraliza a toxicidade por Al, Mn e Fe (MOREIRA *et al.*, 2017). O Ca e Mg presentes nesses corretivos atuam como agentes floclulantes, facilitando ligações polivalentes entre cátions, argila e matéria orgânica, aumentando assim a descompactação do solo e a retenção de água (ANDRADE *et al.*, 2025).

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é considerada uma das leguminosas mais importantes para a segurança alimentar global, sobretudo devido ao seu alto valor proteico e à produção de óleo vegetal (ROSA *et al.*, 2022). Na safra 2023/2024 o Brasil produziu 147.381,8 mil toneladas de soja (CONAB, 2024). As áreas de cultivo destinadas à produção dessa *commodity* vem sendo expandidas principalmente no Cerrado brasileiro (SEVERO SANTOS; NAVAL, 2020), que apesar do predomínio de áreas de baixa fertilidade típicas de Latossolos e Argissolos, possui características adequadas para a agricultura, como topografia, temperatura e umidade (FAGERIA; BALIGAR, 2008). Esses aspectos, aliados com investimentos tecnológicos e de manejo do solo, impulsionaram a agricultura nessas áreas, fazendo do Cerrado uma das maiores regiões produtivas do mundo (TRABAQUINI *et al.*, 2017).

Na região do Cerrado a calagem já é bem estabelecida para a soja (MOREIRA *et al.*, 2017; VIEIRA FONTOURA *et al.*, 2019) e outras culturas agrícolas (SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010; NORA; AMADO, 2013; COSTA *et al.*, 2018). Entretanto, ainda há lacunas na compreensão de como a calagem modula a fisiologia das plantas, especialmente da soja, de modo a culminar em incrementos na produtividade e na qualidade das sementes.

Evidencia-se que a calagem afeta o desempenho das culturas de maneira multifatorial, com efeitos diretos e indiretos (BENNETT *et al.*, 2014; HOLLAND *et al.*, 2018; MENG *et al.*, 2019). Portanto, para compreender como o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas é beneficiado por essa prática, se faz necessário analisar os diferentes níveis de respostas, desde as fisiológicas, metabólicas até as expressões fenotípicas.

Nessa perspectiva, sob a hipótese de que a calagem modula as respostas morfofisiológicas e metabólicas, levando a incrementos produtivos superiores, quando

comparadas às plantas de soja cultivadas em solo sem calagem, objetivou-se avaliar os parâmetros morfofisiológicos e metabólicos durante o crescimento vegetativo e reprodutivo de *Glycine max* cultivada em solo de Cerrado com e sem calagem, bem como os impactos sobre a produtividade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Condições de cultivo e material vegetal

Para o experimento foi utilizado solo do Cerrado coletado na FLONA de Paraopeba (19° 16' 54" S 44° 24' 32" O), Minas Gerais, à 0-20 cm de profundidade, o qual é caracterizado como Latossolo Amarelo (NERI, 2007). Uma amostra homogênea do solo foi retirada para as seguintes análises: pH, N total, P, K, Ca, Mg, Al, Fe, Zn, Mn, Cu e S as quais foram avaliados por espectrometria de emissão óptica de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES, Perkin Elmer Optima 3000XL, Maryland, USA) (Tabela 1).

Em seguida, o solo foi fracionado em dois tratamentos: sem calagem (NL) (controle) e com calagem (L). Para a neutralização do pH foi utilizado calcário PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) 75, e a quantidade requerida foi calculada de acordo com o método de saturação por bases, elevada a 70% (SOUSA; LOBATO, 2004), mantendo-se o solo úmido para a total solubilização do calcário. Após 90 dias de neutralização da acidez, ambos os tratamentos receberam adubação recomendada para a cultura de soja, dispensando-se o nitrogênio devido a inoculação das sementes com a bactéria *Bradyrhizobium japonicum*, de acordo com o método de quinta aproximação (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999). Após a calagem e adubação, uma nova análise nutricional do solo (Pré-semeadura) foi realizada para avaliar a efetividade da aplicação do calcário na correção da acidez do solo. Ao final do experimento (Pós-colheita), os mesmos parâmetros já citados anteriormente foram avaliados no solo para avaliar as mudanças químicas após o cultivo da soja (Tabela 1).

Para todo o experimento foram utilizadas sementes de soja (*Glycine max*) genótipo 50I52RSF IPRO, fornecidas pelo Programa de Melhoramento da Qualidade da Soja do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária da Universidade Federal de Viçosa (BIOAGRO/UFV). As sementes foram previamente inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* para auxiliar na fixação de nitrogênio e semeadas quatro sementes para cada vaso de 5 L contendo solo sem calagem (NL) ou com calagem (L). No estágio cotiledonar, apenas uma planta foi mantida por vaso, constituindo a unidade experimental. O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, entre julho e outubro de 2024,

sob temperatura média de 19,7 °C e umidade relativa de 72,4%. Durante todo o período, os vasos foram irrigados a 80% da capacidade de campo.

As avaliações morfofisiológicas e metabólicas foram realizadas no estágio vegetativo V3 (terceiro trifólio completamente expandido) e no reprodutivo R5 (enchimento de grão). Ao final do ciclo, no estágio R8 (maturação plena) foram avaliados os parâmetros de produtividade e qualidade dos grãos.

2.2 Avaliações morfométricas e nutricionais

O comprimento caulinar e radicular foi obtido com fita métrica e o diâmetro do caule verificado na região do coleto com auxílio de paquímetro. O número de nodulações simbióticas foi quantificado manualmente no estágio R5. A massa seca específica para cada órgão foi obtida em balança analítica de precisão após 72h de secagem em estufa de ventilação forçada a 65 °C. Para a área foliar total, os trifólios V2 e V3 foram fotografados no estágio vegetativo e reprodutivo, respectivamente, e a área foi mensurada pelo software Image J®.

As análises nutricionais foram realizadas em 0,7 g de material vegetal seco (raízes e parte aérea). A concentração de N foi determinada através de digestão sulfídrica. Para os demais macro e microelementos (P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn, Mn) e Al, o material foi digerido em solução nitroperclórica (3:1) em bloco digestor (TEDESCO *et al.*, 1995) e analisados em espectrômetro de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES; Optima 8300 DV, Perkin Elmer, Shelton, CT, EUA). O fator de translocação (TF) foi calculado a partir da razão entre o acúmulo na parte aérea e raiz para cada elemento.

2.3 Avaliação da morfologia externa da raiz por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Ápices radiculares de 1 cm de comprimento foram coletados durante os estágios V3 e R5 e fixados em glutaraldeído 2,5% (v/v) em tampão cacodilato (pH 7,2), seguido de desidratação em série etílica e secagem com CO₂ líquido em secador de ponto crítico (Critical Point Dryer - Bal-tec, CPD 030). As amostras foram fixadas em suporte metálico e revestidas com ouro (Quorum Technologies modelo Q150T, Ashford, Kent, UK) para avaliação da morfologia externa dos ápices radiculares. O

material foi documentado em microscópio eletrônico de varredura (FEG Jeol IT700 HRLA) com uma tensão acelerada de 20 kV.

2.4 Trocas gasosas

As avaliações de trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* foram efetuadas no segundo trifólio completamente expandido no estágio vegetativo (V3) e no quarto trifólio completamente expandido durante o estágio reprodutivo (R5), usando um analisador de gases do infravermelho (LI-6400XT, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA) equipado com uma câmara de fluorescência integrada (LI-6400-40; Li-Cor Inc.).

As análises de assimilação líquida de carbono (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática de vapor de água (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i) e transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram conduzidas de 7:00 às 11:00 da manhã, com concentração ambiente de CO_2 (C_a) de $420 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de ar e fluxo de $300 \mu\text{mol s}^{-1}$, mantendo a densidade de fluxo fotossintético (PPFD) a $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com 10% de luz azul para maximização da abertura estomática (FLEXAS *et al.*, 2008). As medições foram realizadas sob temperatura ambiente média de 30°C e umidade relativa do ar ambiente de 28%. Foram estimados o rendimento quântico potencial do PSII (F_v/F_m), rendimento quântico efetivo do PSII (ϕPSII), taxa aparente de transporte de elétrons (ETR), rendimento quântico da dissipação regulada de energia (NPQ) e a fração de centros de reação abertos do PSII (q_L) (KRAMER *et al.*, 2004).

2.5 Metabolismo primário

Para essa análise foram utilizados os mesmos trifólios analisados para obtenção dos parâmetros fotossintéticos (segundo e quarto trifólio nos estágios V3 e R5, respectivamente), os quais foram coletados de 7:30 a 7:50 da manhã e imediatamente congelados em nitrogênio líquido e armazenados em freezer -80°C . As folhas foram liofilizadas a -20°C durante 72h e maceradas em moinho de bolas.

A extração foi realizada de acordo com o protocolo descrito por Lisec *et al.* (2006), com adaptações. A fração solúvel foi recolhida e armazenada em freezer a -20°C para posterior quantificação de glicose, frutose, sacarose e aminoácidos.

2.5.1 Pigmentos totais

Para a quantificação de clorofila *a*, clorofila *b*, e carotenoides, foram adicionados ao extrato metanólico metanol 100% (p/v). As leituras foram conduzidas em leitor de microplaca (Molecular Devices, Sunny Valle, EUA) a 470, 653 e 666 nm (LICHTENTHALER; WELLBURN, 1983).

2.5.2 Concentração de açúcares

A quantificação de glicose, frutose e sacarose foi realizada de acordo com o protocolo por Fernie *et al.* (2001) com adaptações. Para isso, ao extrato metanólico foram adicionados metanol 50% em um mix de reação composto por tampão HEPES, ATP 109 mM (60 mg mL⁻¹); NADP 48,4 mM (36 mg mL⁻¹); e glicose-6-fosfato desidrogenase (G6-PDH, 700 U mL⁻¹).

A quantidade de glicose foi estimada pela formação de NADPH pela adição de 1,5 U de hexocinase (HK). A quantidade de frutose foi obtida pela adição de 0,7 U de phosphoglucose isomerase (PGI) e formação de NADPH e a sacarose, quantificada pela formação de NADPH após adição de 5 U da enzima Invertase.

As leituras foram conduzidas a 340 nm, até estabilização da linha de base de acordo com a adição das enzimas, e os valores foram obtidos por meio da equação $\Delta OD / (2,85 \times 6,22)$.

2.5.3 Concentração de amido

O pellet armazenado, resultante da fração insolúvel da extração metanólica, foi lavado sucessivamente em etanol 70% e seco em estufa a 60 °C até adquirir consistência pastosa. A solubilização ocorreu pela adição de NaOH 0,1 M e aquecimento a 95 °C sob agitação constante. Após resfriamento em temperatura ambiente, o extrato foi centrifugado a 13.300 rpm a 4 °C por 5 minutos, e em seguida, o sobrenadante foi coletado para a quantificação de proteínas solúveis totais. À solução de NaOH foram adicionados ácido acético 1 M para neutralização e posterior degradação do amido.

Para degradação, o extrato neutralizado foi adicionado ao mix de degradação composto por: tampão acetato de sódio 50 mM, pH 4,9; amiloglicosidase (170 U mL⁻¹) e α -amilase (325 U mL⁻¹). A placa foi vedada e a reação ocorreu a 37 °C em *overnight*.

Após degradação, foi adicionado em microplaca o extrato, H₂O destilada e o mix de quantificação composto por: tampão HEPES; ATP 109 mM (60 mg mL⁻¹); NADP⁺ 48,4 mM (36 mg mL⁻¹) e glicose-6-fosfato desidrogenase (G6PDH – 700 U mL⁻¹). A leitura foi realizada em comprimento de onda de 340 nm e a quantidade de amido foi estimada pela formação de NADPH produzido pela adição de HK (2 U) (FERNIE *et al.*, 2001).

2.5.4 Aminoácidos totais

A quantificação de aminoácidos totais seguiu o protocolo descrito por Yemm *et al.* (1955). Para cada reação, foram adicionados ao extrato metanólico, tampão citrato de sódio 1 M, pH 5,2 com 0,2% de ácido ascórbico e niidrina 1% em etanol 70%. A microplaca foi vedada e incubada a 95 °C por 20 minutos em termomixer e, em seguida, resfriada durante 10 minutos em freezer -20 °C e mantida no escuro.

A determinação da concentração dos aminoácidos foi conduzida de acordo com uma curva padrão de leucina e a leitura foi realizada a 570 nm.

2.5.5 Proteínas totais

A quantidade de proteínas solúveis totais foi obtida pelo método de Bradford (1976), a partir da solução de NaOH. Na microplaca foram adicionados 5 µL do extrato diluído com NaOH 0,1 M, e 250 µL de reagente de Bradford. A reação foi conduzida no escuro.

A concentração de proteínas foi determinada a partir da curva padrão de albumina sérica bovina (BSA) com leitura da absorbância em 595 nm.

2.6 Atividade enzimática do sistema antioxidante

Os ensaios enzimáticos do sistema antioxidante foram conduzidos seguindo o protocolo de extração proposto por Peixoto *et al.* (1999). Para isso, 50 mg de folhas e raízes dos estágios V3 e R5 foram liofilizadas e pulverizadas em tampão de fosfato de potássio 0,1 M, pH 6,8; EDTA 0,1 mM; PMSF 1 mM e PVPP 1% (p/v). Após adição do extrator, as amostras foram homogeneizadas em vórtex e centrifugadas a 12000 g a 4 °C durante 20 minutos e o sobrenadante foi acondicionado em freezer -80 °C até o momento das análises.

2.6.1 Atividade da peroxidase total (POX, EC 1.11.1.7)

Para a atividade da peroxidase total, utilizou-se extrato enzimático bruto de folhas e raízes dos estágios vegetativo e reprodutivo, em meio de reação composto por solução tampão fosfato de potássio 25 mM pH 6,8, pirogalol 20 mM, H₂O₂ 20 mM. A atividade enzimática foi determinada pelo aumento da absorbância durante 1 minuto de leitura a 420 nm e 30 °C, e os resultados calculados pelo coeficiente de extinção molar de 2,4 mM⁻¹ cm⁻¹ (CHANCE; MAEHLEY, 1955).

2.6.2 Atividade da ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)

Para a atividade da ascorbato peroxidase, utilizou-se extrato enzimático bruto em meio de reação com tampão fosfato de potássio 50 mM pH 7,0 com EDTA 0,1 mM, ácido ascórbico 0,8 mM e H₂O₂ 1 mM. A atividade enzimática foi determinada pelo decréscimo da absorbância em 290 nm a 25 °C e calculada a partir do coeficiente de extinção molar de 2,8 mM⁻¹ cm⁻¹ (PEIXOTO *et al.*, 1999).

2.6.3 Atividade da superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)

Para a quantificação, o extrato enzimático bruto foi acrescido à solução tampão fosfato de sódio 50 mM pH 7,8 + EDTA 0,1 mM, metionina 13 mM, riboflavina 2 µM e azul de p-nitro tetrazólio (NBT) 75 µM. As amostras foram mantidas sob luz de 1000 lm (10 W) durante 3 minutos para reação.

A atividade da SOD foi determinada pela fotorredução do NBT e produção de formazana azul no meio a 560 nm, considerando-se unidade de SOD a quantidade necessária para a inibição em 50% da fotorredução do NBT (BEAUCHAMP; FRIDOVICHE, 1971).

2.7 Peroxidação lipídica

A quantificação de peroxidação lipídica foi estimada pela reação com ácido tiobarbitúrico (TBA) e formação de malondialdeído (MDA) (HEATH; PACKER, 1968). Para a extração, foram utilizados 50 mg de raízes e folhas coletadas nos estágios V3 e R5, previamente liofilizadas e homogeneizadas em 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) a 1%. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 12.000 g por 15 min a 4 °C. Após isso, 50 µL do sobrenadante foram adicionados a solução contendo TBA 0,5% (p/v) em TCA 20% (p/v), homogeneizados e incubados em banho-maria durante

30 min a 95 °C. A reação foi paralisada em banho de gelo por 10 min e novamente, centrifugadas a 10.000 *g* durante 10 min a 4 °C. Após, a amostra foi coletada e para a leitura. A peroxidação lipídica foi determinada pela formação do complexo MDA-TBA sob leitura nos comprimentos de onda de 532 e 600 nm, e estimada usando o coeficiente de absorvidade molar de 155 mM⁻¹ cm⁻¹.

2.8 Peróxido de hidrogênio (H₂O₂)

A concentração de peróxido de hidrogênio foi determinada pelo método proposto por Gay e Gebicki (2000) e Kuo e Kao (2003). Para a extração, utilizou-se 50 mg de amostra vegetal liofilizada (folhas e raízes nos estágios V3 e R5) em tampão fosfato de potássio 50 mM pH 6,5 contendo cloridrato de hidroxilamina 1 mM (NH₂OH.HCl). A solução foi homogeneizada e centrifugada a 10.000 *g* por 15 minutos a 4 °C e o sobrenadante foi transferido para bloco de armazenamento.

A reação ocorreu em microplaca contendo extrato vegetal, sorbitol 100 mM, FeNH₄(SO₄) 250 µM em H₂SO₄ 25 mM e laranja de xilenol 250 µM. Após 30 minutos de repouso em escuro, a absorbância foi lida a 560 nm e os níveis de H₂O₂ foram estimados com base em uma curva de calibração preparada com padrão autêntico de H₂O₂.

2.9 Ânion Superóxido

Aproximadamente 50 mg de folhas e raízes coletadas nos estágios vegetativo e reprodutivo foram liofilizadas e homogeneizados em mix de extração composto por tampão fosfato de sódio 20 mM, pH 7,8, sal dissódico do ácido etilenodiamino tetracético (Na₂EDTA) 100 µM, NADH 20 µM e H₂O destilada. A reação foi iniciada com 100 µL de epinefrina 1,2 mM em HCl 0,1 N em frasco de penicilina vedado e protegido da luz, seguido de incubação à 28 °C durante 5 minutos (MOHAMMADI; KARR, 2001).

A leitura foi realizada sob comprimento de onda de 480 nm em leitor de microplaca durante 10 minutos e a produção de ânion superóxido foi determinada pelo acúmulo de adrenocromo a partir do coeficiente de absorvidade molar de 4,0x 10³ M⁻¹ cm⁻¹ (BOVERIS *et al.*, 2002).

2.10 Rendimento produtivo e quantidade de óleo e proteínas do grão

Ao atingirem o estágio de maturação plena (R8) (FEHR *et al.* 1971) foram contabilizados o número de vagens por planta, número médio de grãos por planta e peso dos grãos. Para estimativa de óleo e proteínas, aproximadamente 20 grãos foram pulverizados em moinho e os espectros foram obtidos em espectrômetro infravermelho FT-NIR (Antaris II FT NIR Analyzer Thermo Scientific) entre as faixas de 1000 a 2500 nm em triplicata e os resultados expressos em porcentagem (SOARES *et al.*, 2024).

2.11 Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos (NL e L) e cinco repetições. As coletas para análises morfofisiológicas e metabólicas foram realizadas nos estágios vegetativo (V3) e reprodutivo (R5), enquanto o material destinado à avaliação do rendimento produtivo foi obtido no estágio de maturação plena (R8).

A normalidade dos dados foi obtida pelos testes de Shapiro-Wilk 0,05 de probabilidade. Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e, quando significativos, ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para os dados que não atenderam ao critério de normalidade, utilizou-se a transformação de Box-Cox. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p \leq 0,05$) foi utilizado quando, mesmo após a transformação, os dados não atendiam ao pressuposto de normalidade.

A correlação entre as características morfofisiológicas e metabólicas em plantas cultivadas em ausência e presença de calagem foi obtida através do coeficiente de correlação linear de Pearson (r). Ao final, realizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) para agrupamento das variáveis significativas. Para todas as análises, utilizou-se o software R (R Development Core Team 2019).

3. RESULTADOS

3.1 A calagem altera as propriedades químicas do solo

O solo original coletado na Flona de Paraopeba apresenta valor de pH 4,84, baixa concentração de macro e micronutrientes além de uma maior concentração de Al (Tabela 1). Após a adubação do solo, a concentração de todos os micronutrientes e macronutrientes suplementados foi elevada em ambos os tratamentos (com calagem e sem calagem), atingindo os valores ótimos exigidos para a cultura da soja (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999). O solo sem calagem (NL) apresentou redução de 13% no pH, atingindo o valor de 4,2. Por outro lado, o solo com aplicação de calagem (L) o pH foi elevado para 5,34, ou seja, 10% de aumento. Adicionalmente, a concentração de alumínio (Al) disponível decresceu em 57% no solo sem calagem com adubação e em 97% no solo com calagem e adubação (Tabela 1). Além disso, após o término do experimento todos os parâmetros foram reavaliados e evidenciou pH de 4,08 e concentração de Al de $1,08 \text{ cmol dm}^{-3}$ para o solo NL e pH de 5,27 e concentração de Al de $0,06 \text{ cmol dm}^{-3}$ no solo L. Concomitantemente, a concentração da maioria dos nutrientes essenciais no solo reduziu após o cultivo (Tabela 1).

3.2 Calagem afeta as características morfológicas e nutricionais da soja

Após tratamento com solo NL e L, nos estágios de desenvolvimento V3 e R5 houve alteração no fenótipo da parte aérea das plantas de soja (Fig. 1A). O comprimento da parte aérea não variou entre os tratamentos e os estágios de desenvolvimento (Fig. 1B). No entanto, houve maior acúmulo de massa seca de parte aérea no tratamento L em relação ao NL, com incrementos de 152% no estágio vegetativo e 62% no reprodutivo (Fig. 1C). A área foliar (Fig. 1D) foi superior para as plantas cultivadas em solo L durante o estágio vegetativo, enquanto o diâmetro do caule (Fig. 1E) superior em ambos os estágios fenológicos para o mesmo tratamento.

O fenótipo do sistema radicular das plantas de soja foi alterado conforme os tratamentos, nos dois estágios de desenvolvimento, V3 e R5 (Figura 2A). O cultivo em solo L promoveu melhorias no crescimento radicular apenas no estágio vegetativo com 48% de acréscimo (Figura 2B). Adicionalmente, no solo L também houve maior acúmulo de massa seca radicular em ambos os estágios de desenvolvimento com 124% no V3 e 32% no R5 (Figura 2C). A formação de nódulos simbióticos foi

fortemente favorecida pela presença da calagem, resultando em média de 58 nódulos por planta no estágio de desenvolvimento R5 (Fig. 2E). O comprimento total das plantas diferiu entre os tratamentos, com acréscimo de 16% e 43% no estágio vegetativo e reprodutivo, respectivamente (Fig. 2D).

Durante o estágio vegetativo, plantas cultivadas em solo com calagem apresentaram maiores acúmulos de N, P, K, Ca, Mg e Cu na parte aérea (Tabela 2). Já na raiz, houve maior acúmulo de P, K, Mg, e Fe para o mesmo estágio de desenvolvimento. No estágio reprodutivo apenas o acúmulo de N, Ca e Mg foram maiores no tratamento com calagem, com acréscimo de 142%, 67% e 110%, respectivamente, para a parte aérea. Na raiz houve aumento no acúmulo de Mg e Fe durante o estágio reprodutivo após tratamento com calagem.

No tratamento sem calagem, apenas o Zn foi acumulado em maior quantidade na parte aérea, durante o estágio vegetativo. No reprodutivo, além desse elemento, o Mn também foi acumulado em maior quantidade nessa região. Para as raízes, houve maiores acúmulos apenas durante o estágio reprodutivo, com maiores concentrações de N, P, Cu, Zn e Mn.

O maior acúmulo de Al foi constatado nas raízes de plantas com calagem, sendo aproximadamente 4,2 vezes maior no estágio vegetativo e 9,5% maior no reprodutivo quando comparado às plantas cultivadas em solo sem calagem. O fator de translocação revelou maior transporte de macronutrientes para a parte aérea ($TF > 1$) e de Mn, em ambos os tratamentos e estágios de desenvolvimento. Ademais, no tratamento L houve maior transporte de N, Cu para a parte aérea durante ambos os estágios de desenvolvimento, além de P e Zn apenas no estágio reprodutivo (Tabela 2).

Embora o fator de translocação indique que os micronutrientes tenham sido majoritariamente mantidos nas raízes, o tratamento com calagem resultou em transporte preferencial de Cu e Zn para a parte aérea das plantas. Adicionalmente, apesar do maior acúmulo de Al em raízes do tratamento L, houve maior translocação desse elemento para a parte aérea de plantas do tratamento NL, em ambos os estágios de desenvolvimento.

3.3 Calagem modula a morfologia externa de ápices radiculares

A micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou alterações na morfologia externa dos ápices radiculares entre os tratamentos durante

o estágio vegetativo e reprodutivo (Fig. 3). No tratamento sem calagem houve uma desorganização nas células da epiderme, alteração na morfologia do ápice radicular e sinuosidades no formato da raiz tanto no vegetativo quanto no reprodutivo (Fig. 3A, B). Por outro lado, plantas com calagem apresentaram maior organização e morfologia normal dos ápices radiculares (Fig. 3C, D).

3.4 Eficiência fotossintética é pouco afetada pela acidez do solo

A concentração de clorofila *a* não foi alterada entre os tratamentos (Fig. 4A). Por outro lado, a concentração de clorofila *b* (Fig. 4B) reduziu em 18% no estágio vegetativo e 22% no reprodutivo de plantas cultivada em solo com calagem. Além disso, a razão clorofila *a/b* aumentou em 13% no tratamento com calagem no estágio reprodutivo (Fig. 4C). A concentração de carotenoides reduziu nas plantas cultivadas em solo L em ambas as fases de desenvolvimento (Fig. 4D).

A fotossíntese líquida reduziu 17% em plantas cultivadas em solo L durante o estágio vegetativo (Fig. 5A). Ademais, os parâmetros de transpiração, condutância estomática e concentração de carbono interno não foram afetados pelos tratamentos (Fig. 5B, C e D).

O rendimento quântico máximo do PSII não apresentou variações entre os tratamentos para ambos os estágios (Fig. 6A). Contudo, houve aumento no rendimento quântico efetivo (Fig. 6B) e na estimativa de centros de reação abertos do PSII (Fig. 6D) nas plantas do tratamento L durante o estágio reprodutivo. No período vegetativo, a taxa de transporte de elétrons (ETR) foi inferior no tratamento com calagem, mas aumentou durante o estágio reprodutivo (Fig. 6C). A dissipação não fotoquímica (NPQ) foi maior no tratamento com calagem durante o estágio vegetativo, com incremento de 18%, mas não houve diferença durante o reprodutivo (Fig. 6E).

3.5 Concentração de carboidratos é influenciada pela calagem

A concentração de glicose e sacarose não variaram entre os tratamentos em ambos os estágios analisados (Fig. 7A, C). Contudo, a concentração de frutose aumentou 233% após cultivo em solo L no estágio vegetativo, e a de amido reduziu 30% nesse mesmo tratamento durante o estágio reprodutivo (Fig. 7B, D). A concentração e aminoácidos totais e proteínas solúveis não foi afetada pelos tratamentos (Fig. 7E e F).

3.6 Acidez do solo modula o *status redox* em raízes de soja

A atividade enzimática do sistema antioxidante foi modulada com a aplicação de calagem, principalmente no sistema radicular (Fig. 8). Nas folhas, a atividade da SOD e APX não diferiu em nenhum dos estágios fenológicos (Fig. 8A, E). No entanto, a atividade das POX em folhas reduziu em 50% a atividade durante o período reprodutivo em plantas cultivadas em solo com calagem (Fig. 8C). Já nas raízes, a atividade da SOD e POX foram superiores em ambos os estágios em relação ao tratamento sem calagem, mas a atividade da APX não foi afetada entre os tratamentos (Fig. 8B, D e F). No estágio reprodutivo, houve aumento de aproximadamente dez vezes na atividade da SOD e dezenove vezes para a atividade da POX para o tratamento L.

No solo com calagem a peroxidação lipídica reduziu em 39% em raízes durante o estágio reprodutivo e aumentou nas folhas no estágio vegetativo (Fig. 9A, B). A concentração de H_2O_2 manteve-se estável nas folhas (Fig. 9C), mas reduziu nas raízes em ambos os estágios de desenvolvimento após tratamento com calagem (Fig. 9D). Já a concentração de $O_2^{\cdot-}$ não foi alterada, independentemente do estágio fenológico (Fig. 9E e F).

3.7 Calagem impacta positivamente sobre a produtividade e aumenta a qualidade dos grãos da soja

A aplicação de calagem promoveu incrementos na produtividade da soja (Fig. 10). O número de vagens por planta, o número de grãos por planta e o peso médio de grãos por planta aumentaram em 77, 71 e 77% respectivamente após cultivo da soja em solo com calagem (Fig. 10A, B, C). Somado a isso, a porcentagem de proteínas dos grãos de plantas deste mesmo tratamento foi 15% maior (Fig. 10D), enquanto a quantidade de óleo reduziu 8,3% em relação ao cultivo em solo NL (Fig. 10E).

3.8 Análise de componentes principais mostra separação entre os tratamentos

A soma dos dois primeiros componentes principais explicou 87,8% da variabilidade total dos dados significativos relativos à parte aérea e 87,5% para a raiz

no estágio vegetativo (Fig. 11A e C). Entre as variáveis explicadas pelo PC1, os macronutrientes, especialmente Ca e Mg, bem como o NPQ, concentração de frutose e massa seca, apresentaram maior contribuição na parte aérea para o tratamento L (Fig. 11A). Nas raízes do tratamento L, as variáveis de massa seca, P, K, Ca, Fe e Al, além da atividade da SOD apresentaram maior contribuição na formação do PC1 (Fig. 11C).

No estágio reprodutivo, a variabilidade dos parâmetros da parte aérea foi explicada em 88,5% pela soma dos componentes principais 1 e 2, já para as raízes, os componentes principais PC1 e PC2 somaram 85,4% (Fig. 11B e D). A total separação dos grupos dos tratamentos para a parte aérea foi influenciada pelas variáveis de acúmulo de Mg, produtividade (número de vagens, grãos e peso de grãos), ETR e ϕ PSII, que apresentaram forte correlação positiva com o tratamento L no eixo do PC1 (Fig. 11B). Nas raízes, para o mesmo estágio, a nodulação e a atividade da SOD apresentaram maior correlação com o PC1, estando associados ao tratamento com calagem (Fig. 11D).

4. DISCUSSÃO

Neste trabalho, buscamos reproduzir as condições de tratamento seguidas em campo para corrigir a acidez e as deficiências nutricionais, especificamente em solo do Cerrado, para o cultivo da soja (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999), investigando como esta prática modula, direta e indiretamente, o desenvolvimento dessa cultura. De forma inédita, este estudo ainda abrange todo o ciclo fenológico da soja, incluindo análises morfológicas e fisiológicas, a fim de analisar os efeitos da acidez ao longo do desenvolvimento e ainda, elenca os principais fatores relacionados à produtividade dessa cultura em condições de neutralização de acidez.

O N não foi suplementado ao solo, pois com a inoculação prévia das sementes de soja com a bactéria *Bradyrhizobium japonicum*, é dispensada a adubação nitrogenada (RIBEIRO; GUIMARÃES, 1999; CRISPINO *et al.*, 2001). Já a redução na concentração de Fe após a calagem é resultado do aumento no pH, no qual esse elemento se encontra menos disponível (BIAN *et al.*, 2013).

É bem conhecido que a disponibilidade dos elementos no solo é modulada pelo pH (BIAN *et al.*, 2013). O aumento de H^+ no solo pode provocar lixiviação pela competição com cátions, reduzir a capacidade tamponante, disponibilidade de nutrientes

e interferir negativamente na atividade microbiana (MENG *et al.*, 2019). Isso faz da calagem uma prática amplamente utilizada para amenizar os efeitos deletérios relacionados à acidez, através do aumento da concentração de Ca e Mg na solução (FAGERIA; NASCENTE, 2014) e posteriormente contribuindo para melhorias das propriedades físicas (BENNETT *et al.*, 2014) e biológicas do solo (HOLLAND *et al.*, 2018). O aumento na disponibilidade de macronutrientes e o decréscimo de metais pesados trocáveis no solo, especialmente o Fe, após a calagem, são bem documentados (FAGERIA; BALIGAR, 2008; DA COSTA *et al.*, 2018; MOREIRA *et al.*, 2024). Esses fatores, coletivamente, proporcionam melhores condições para a aquisição de nutrientes e, em consequência, melhor desenvolvimento das plantas.

O principal objetivo da aplicação da calagem em solo é justamente garantir ou, melhorar as condições físico-químicas que culminem em melhor *status* nutricional para a planta. Além disso, o fornecimento direto de Ca e Mg pelos materiais da calagem reduz a deficiência de cátions básicos (BOLAN; ADRIANO; CURTIN, 2003). A qualidade nutricional, incluindo a presença e balanço de nutrientes, é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas (EL AMRANI, 2024). Em condições subótimas de nutrição, a amplitude de processos bioquímicos é afetada negativamente, bem como a alocação dos elementos entre os órgãos, implicando em baixa biomassa da planta (SINGH; REDDY, 2017). Assim, ao aumentar a biodisponibilidade de macro e micronutrientes essenciais, a calagem possibilitou maior absorção e transporte para as células radiculares, culminando em melhores características fenotípicas para as plantas desse tratamento (BOSSOLANI *et al.*, 2021b; MOREIRA *et al.*, 2024; YLIVAINIO *et al.*, 2024).

Entre os macronutrientes, N, P e K atuam fortemente no crescimento vegetal, sendo essenciais na constituição de biomassa, transferência de energia e potencial osmótico (KIRKBY, 2012). O N participa de todos os estágios de desenvolvimento das plantas, sendo o constituinte primário de proteínas, ácidos nucleicos, fitormônios, clorofilas e associado à eficiência do sistema antioxidante (WANG *et al.*, 2024). O P está envolvido em uma ampla diversidade de processos bioquímicos como a síntese de ácidos nucleicos, integridade estrutural de membranas, produção e funcionalidade do aparato fotossintético e metabolismo energético (HASAN *et al.*, 2016; SHI *et al.*, 2020). A expansão foliar é altamente sensível à disponibilidade de P (FAGERIA; MOREIRA, 2011). Em solos ácidos, o P reage com óxidos insolúveis de alumínio, ferro ou manganês (MAHDI; HASSAN; HUSSAIN, 2011), reduzindo sua disponibilidade para a

planta e em consequência, podendo levar à inibição da expansão foliar e redução da taxa fotossintética (SHI *et al.*, 2020). Já o K, é fundamental para processos funcionais e de desenvolvimento das plantas, entre eles, ativação de enzimas, crescimento celular e regulação osmótica (XU *et al.*, 2020). Além desses elementos, o Ca e Mg, elementos essenciais, também foram absorvidos em maiores quantidades nas plantas L. O Ca desempenha uma amplitude de funções envolvidas na estruturação e sinalização celular. Já o Mg é essencial na composição da clorofila e ativação de diversas enzimas (PODAR; MAATHUIS, 2022).

A formação de nódulos simbióticos foi positivamente modulada pela elevação do pH, com maior formação de nodulações no sistema radicular de plantas do tratamento L. Para que a fixação biológica de nitrogênio ocorra adequadamente, solos ligeiramente ácidos ($\text{pH} \approx 5,1$) a ligeiramente alcalinos ($\text{pH} \approx 8,9$) são preferíveis para a maioria dos simbioses (KACHIGUMA; TINDWA; MREMA, 2019). Em nosso estudo, o pH do solo após a calagem apresentou o valor de 5,34 e, após a colheita, este valor passou a 5,27, o que se aproxima da condição de pH ideal para as interações simbióticas. Essa resposta também foi observada por Alves *et al.* (2021), evidenciando que a calagem aumenta, entre outros parâmetros, a nodulação radicular e a quantidade de nitrogênio fixado.

Adicionalmente, o estabelecimento e crescimento dos nódulos radiculares é altamente dependente de Ca e Mg (ALVES *et al.*, 2021). O processo inicial da infecção é sinalizado pelo Ca, que atua na detecção dos fatores de nodulação e comunicação planta-bactéria (NELWAMONDO; MAAZA; MOHALE, 2024). Em plantas de soja foi verificado que o Mg é um elemento importante para a homeostase do N, regulando positivamente a expressão dos genes de transportadores de nitrato, NRT2.1 e NRT2.2, principalmente através da alocação de sacarose da parte aérea para o sistema radicular (PENG *et al.*, 2018; PENG *et al.*, 2020). A maior aquisição desses elementos, associada a elevação do pH no tratamento com calagem, aumentou a eficiência na absorção e acúmulo de macronutrientes, especialmente na fixação de N, o que, por sua vez, promoveu as melhorias no fenótipo das plantas desse tratamento.

Além do maior acúmulo de nitrogênio nas plantas cultivadas em solo com calagem, também foi observado um elevado fator de translocação nesse tratamento. Estes resultados sustentam o aumento de biomassa da parte aérea e indicam o aumento na demanda de carbono e nitrogênio para a formação dos grãos (FAGERIA; MOREIRA, 2011), os quais foram maiores no tratamento com calagem.

Apesar da calagem reduzir significativamente a concentração de Al no solo, o pH de 5,3 ainda possibilitou a biodisponibilidade desse metal para as raízes (BIAN *et al.*, 2013; BOJÓRQUEZ-QUINTAL *et al.*, 2017). De modo adicional, o maior crescimento e desenvolvimento da parte aérea, e principalmente do sistema radicular das plantas crescidas em solo com calagem, permitiu uma maior área de contato das raízes com o solo e um maior fluxo transpiratório total, possivelmente resultado em uma maior taxa de absorção nutricional, e consequentemente de metais como o Al (WANG; INUKAI; YAMAUCHI, 2006). Contudo, mesmo com o maior acúmulo desse metal nos tecidos radiculares das plantas cultivadas com calagem, não houve efeitos danosos sobre a morfologia, fisiologia e metabolismo nesse tratamento.

A maior eficiência na absorção e no uso de nutrientes na presença de Al confere maior capacidade de superar essa condição (VASCONCELOS *et al.*, 2020). A absorção de Mg e Ca, por exemplo, é correlacionada positivamente à resistência ao Al (BOSE *et al.*, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 2020). Assim, a maior capacidade de aquisição de nutrientes em solo com calagem também contribuiu para a mitigação dos possíveis efeitos negativos provocados pelo Al às células do sistema radicular dessas plantas.

Aliado a esse resultado, plantas do tratamento L demonstraram índices de fator de translocação (TF) menores que 1 para o Al e, ainda, inferiores às plantas NL, o que indica maior fitoestabilização desse metal nas células radiculares (KUMAR *et al.*, 2022). A absorção e distribuição desses elementos, essenciais e não-essenciais, é coordenada pela capacidade de absorção pelas raízes, movimento raiz-parte aérea e transporte fonte-dreno (KHAN; CASTRO-GUERRERO; MENDOZA-COZATL, 2014). Para plantas cultivadas produtoras de grãos, especialmente a soja, a maior restrição do Al ao sistema radicular, indicado pelo TF, é vantajosa, uma vez que dificulta o transporte desse metal para tecidos foliares com atividade fotossintética e estruturas reprodutivas, contribuindo com o enriquecimento nutricional seguro dos grãos (SPEROTTO *et al.*, 2014).

A análise da morfologia externa da raiz por microscopia eletrônica de varredura revelou proeminentes danos sobre a morfologia radicular das plantas do tratamento NL. Já para os ápices radiculares do tratamento L, não houve danos externos expressivos, apesar do maior acúmulo de alumínio no órgão. Essa diferença é um indicativo de que a intensidade dos danos mecânicos observados nas plantas cultivadas sem calagem pode ter sido resultado da interação entre Al e os componentes de parede

celular, como também do elevado acúmulo de Mn, que induziu expansão celular desigual e formação de rachaduras na superfície radicular (ČIAMPOROVÁ, 2002; ZHAO *et al.*, 2017).

As clorofilas são importantes indicativos da capacidade fotossintética das plantas (SHAH; HOUBORG; MCCABE, 2017), contudo, situações de estresse abiótico podem modular a concentração desses pigmentos e, associados à área foliar, são importantes indicativos de estresse vegetal (CARTER, 1994; SHAH; HOUBORG; MCCABE, 2017). Além das clorofilas, a síntese de carotenoides também é afetada por perturbações ambientais, geralmente o aumento na concentração desses pigmentos, também conhecidos como pigmentos acessórios, ocorre como mecanismo de fotoproteção para dissipação de excesso de energia e eliminação de radicais livres (BOUVIER *et al.*, 2005; HOLT *et al.*, 2005).

A absorção de energia ocorre frequentemente em maior intensidade do que a capacidade de utilização para a etapa fotoquímica, especialmente quando o crescimento da planta é limitado por fatores abióticos, como a restrição nutricional (PINNOLA; BASSI, 2018). Essa condição de déficit nutricional implica na redução da taxa de crescimento, por exemplo, o que por sua vez, determina a força do dreno através da demanda por fotoassimilados e, por fim, modula a capacidade fotossintética das folhas (DEMMIG-ADAMS; STEWART; ADAMS, 2014). Em soja foi observado que a redução no número de órgãos dreno leva ao maior acúmulo foliar de sacarose (KASAI, 2008). É demonstrado ainda, que o acúmulo de carboidratos precede a redução da taxa fotossintética através da regulação negativa da expressão de genes associados a fixação de carbono, como a rubisco e a fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) (DEMMIG-ADAMS; STEWART; ADAMS, 2014; MARQUARDT; HENRY; BOTHA, 2021). O maior acúmulo de amido observado nas plantas do tratamento NL, especificamente no estágio reprodutivo, pode então estar associado ao baixo fluxo de carbono para drenos fortes, onde há altas exigências metabólicas (STREB; ZEEMAN, 2012). A redução do número de drenos ativos também implica em decréscimo da eficiência do PSII e aumento na produção de carotenoides (ADAMS *et al.*, 2013), o que também foi observado no tratamento NL.

A redução na taxa fotossintética de plantas do tratamento L (17%), por outro lado, não foi suficientemente alta para implicar em inibições nos parâmetros fenotípicos, mas revelou maior eficiência no uso de nutrientes, tendo em vista os altos ganhos de biomassa obtidos para essas plantas. Além disso, a concentração de frutose foi

superior nesse tratamento. A frutose é produto exclusivo do metabolismo da sacarose pela ação da sacarose sintase (SuS), portanto, o aumento na concentração desse carboidrato pode indicar maior investimento em crescimento e desenvolvimento, em detrimento do armazenamento, nas plantas com calagem (VEGA *et al.*, 2021).

Nessa perspectiva, é possível que a acidez do solo NL, ao reduzir a biomassa da planta pela restrição de absorção de nutrientes, diminuiu também a força dos órgãos dreno. A redução da taxa de crescimento desses órgãos levou à maior acúmulo de amido, sem redução imediata na taxa fotossintética, desencadeando a ativação dos mecanismos de fotoproteção e dissipação de excesso de energia para evitar danos oxidativos, através do aumento da produção de carotenoides (HOLT *et al.*, 2005). Já nas plantas cultivadas em solo L, a eficiência na absorção e uso dos nutrientes pode ter compensado a redução da fotossíntese líquida, o que contribuiu para maior crescimento pela eficiência no metabolismo de carboidratos.

O transporte de elétrons entre os fotossistemas é influenciado tanto pelas condições de luminosidade quanto pelo status bioquímico da folha. Este último envolve a concentração de clorofilas e a estrutura foliar, fatores que determinam a taxa de absorção de energia luminosa e, conseqüentemente, a eficiência da captura de elétrons para transporte (JIN; WANG; ZHUANG, 2024).

A depleção de nutrientes também compromete negativamente esse processo. Em condições de deficiência de Fe, observa-se decréscimo na transferência de elétrons entre os fotossistemas, em virtude da participação desse elemento em reações redox e como cofator enzimático (ROCHAIX, 2011). De forma semelhante, a deficiência de P reduz a disponibilidade de compostos ricos em energia, como adenosina trifosfato (ATP), e provoca distúrbios no balanço redox da nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato (NADP⁺). Essas alterações resultam em maior dissipação não fotoquímica, ao mesmo tempo em que inibem a dissipação fotoquímica por meio da excitação do PSII (LU *et al.*, 2025; SHI *et al.*, 2020).

No presente estudo, a maior eficiência no transporte de energia constatada nas plantas cultivadas em solo com calagem pode estar associada a concentrações ligeiramente superiores de P e Fe foliar. Apesar de tais diferenças não terem sido estatisticamente significativas em relação às plantas sem calagem, é provável que tenham exercido influência positiva, dada a relevância desses nutrientes para o funcionamento da cadeia transportadora de elétrons (LU *et al.*, 2025).

Quando o excesso de energia é absorvido pelo PSII, este pode ser dissipado na forma de calor (NPQ) como mecanismo de fotoproteção contra danos foto-oxidativos. Contudo, tal processo implica na redução da eficiência quântica da captação de luz (Φ PSII), diminuindo, assim, a quantidade de elétrons efetivamente direcionados às reações fotoquímicas (WANG *et al.*, 2022). Isso sugere que durante o estágio reprodutivo das plantas do tratamento L, houve priorização da ativação deste mecanismo fotoprotetor em detrimento da atividade fotoquímica, o que levou aumento no NPQ, como estratégia para prevenir danos foto-inibitórios.

O sistema de defesa antioxidante enzimático mostrou maior eficiência nas plantas com calagem, principalmente no sistema radicular, com aumento da atividade da SOD e POX no estágio reprodutivo. Houve ainda redução na produção de H_2O_2 e de peroxidação lipídica em raízes desse mesmo tratamento. Apesar da moderada reatividade, o H_2O_2 possui meia vida relativamente longa e um pequeno tamanho molecular, o que permite a migração entre diversos compartimentos celulares (BARBOSA *et al.*, 2014). Ademais, o H_2O_2 junto ao $O_2^{\cdot-}$ podem ser diretamente convertidos a $\cdot OH$, uma das espécies mais reativas, capaz de desencadear alterações químicas irreversíveis em diversos componentes celulares (KARUPPANAPANDIAN *et al.*, 2011). Assim, a superóxido dismutase desempenha um papel central na defesa contra o estresse oxidativo, controlando os níveis de $O_2^{\cdot-}$ e formando O_2 e H_2O_2 no processo (SHARMA *et al.*, 2012). Já a alta afinidade da POX, bem como da APX pelo H_2O_2 fazem com que atuem no controle fino dos níveis dessa espécie reativa (MITTLER, 2002).

A eficiência dos mecanismos enzimáticos de defesa contra danos oxidativos depende, entre outros fatores, da velocidade em que essas respostas são ativadas para evitar os efeitos deletérios induzidos por ROS, especialmente em plantas expostas a metais pesados (SOUSA *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2023). O aumento precoce da atividade da SOD e das peroxidases em raízes de soja foi relatado como um importante mecanismo de modulação dos danos oxidativos provocados pela toxidez por Al, podendo ser indicativos de maior tolerância a esse estresse (SILVA *et al.*, 2023). Assim, as respostas enzimáticas observadas para o tratamento L podem ter contribuído positivamente para a manutenção do *status* redox, e preservação da integridade das membranas.

O efeito em cascata desencadeado pela calagem culminou em rendimento produtivo 71% maior (número de grãos) que as plantas cultivadas em solo de Cerrado

sem calagem. Maior rendimento produtivo também foi encontrado em estudos anteriores para soja cultivada em solo com calagem (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; MOREIRA *et al.*, 2017; VIEIRA FONTOURA *et al.*, 2019), demonstrando a efetividade dessa prática sobre as condições nutricionais da soja, refletindo em maior produção de vagens e grãos, especialmente devido à mitigação da acidez do solo (COSTA; CRUSCIOL, 2016; BOSSOLANI *et al.*, 2021a). Adicionalmente, outras culturas de grãos também evidenciaram resultados semelhantes, como milho (*Zea mays*) (NORA; AMADO, 2013), sorgo (COSTA; CRUSCIOL, 2016), trigo (var. *Danda'a*) (YLIVAINIO *et al.*, 2024), arroz (*Oryza sativa*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*) (SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010).

A produção de proteínas nos grãos tem relação negativa com a produção de óleo (PATHAN *et al.*, 2013). A proporção entre esses compostos pode variar entre diferentes genótipos de soja e ainda, ser influenciada por fatores ambientais e nutricionais. Ademais, em nosso experimento, a concentração de proteínas nos grãos das plantas do tratamento com calagem (31%) está dentro da média estimada para sojas cultivadas (GUO *et al.*, 2022).

Diante disso, é possível que o *status* nutricional, interações simbióticas, ganho de biomassa e atividade antioxidante atuaram concomitantemente e favoravelmente para maior incremento produtivo nas plantas cultivadas em solo com calagem.

5. CONCLUSÕES

A calagem aumentou o pH do solo do Cerrado, induzindo maior disponibilidade de nutrientes e reduzindo a concentração de alumínio no solo. Isso contribuiu, principalmente em melhor fenótipo dos órgãos vegetativos e na maior qualidade nutricional da soja, desencadeando maior eficiência nas respostas metabólicas e enzimáticas, quando comparadas as plantas cultivadas em solo ácido do Cerrado. Por fim, a integração dessas respostas proporcionou maior rendimento produtivo e a qualidade de grãos, com maior produção de grãos e proteínas.

Apesar da presença do alumínio nas plantas cultivadas em solo com calagem, o acúmulo desse metal não foi suficiente para desencadear prejuízos sobre o ganho produtivo, o que indica que os benefícios diretos e indiretos promovidos pelo aumento do pH modularam positivamente o crescimento e desenvolvimento da soja nesse tipo de solo.

REFERÊNCIAS

- AGEGNEHU, G. *et al.* Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 71, n. 9, p. 852–869, 31 aug. 2021.
- ALVES, L. A. *et al.* Biological N₂ Fixation by Soybeans Grown with or without Liming on Acid Soils in a No-till Integrated Crop-Livestock System. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104923, may. 2021.
- ANDRADE, M. G. D. O. *et al.* Lime and Gypsum Reduce N-Fertilizer Requirements and Improve Soil Physics, Fertility and Crop Yields in a Double-Cropped System. **Geoderma**, v. 453, p. 117132, jan. 2025.
- BARBOSA, M. R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, p. 453–460, mar. 2014.
- BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICHE, I. Superoxide dismutase: Improved assay and an assay applicable to acrylamide gels. **Analytical Biochemistry**, v. 44, n. 1, p. 276–287. 1971.
- BENNETT, J. McL. *et al.* Influence of Lime and Gypsum on Long-Term Rehabilitation of a Red Sodosol, in a Semi-Arid Environment of New South Wales. **Soil Research**, v. 52, n. 2, p. 120, 2014.
- BIAN, M. *et al.* Molecular Approaches Unravel the Mechanism of Acid Soil Tolerance in Plants. **The Crop Journal**, v. 1, n. 2, p. 91–104, dec. 2013.
- BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E. *et al.* Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1767, 12 oct. 2017.
- BOLAN, N. S.; ADRIANO, D. C.; CURTIN, D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *In: Advances in Agronomy*. Academic Press, 2003. 78p.
- BOSE, J. *et al.* Low-pH and Aluminum Resistance in Arabidopsis Correlates with High Cytosolic Magnesium Content and Increased Magnesium Uptake by Plant Roots. **Plant and Cell Physiology**, v. 54, n. 7, p. 1093–1104, jul. 2013.
- BOSSOLANI, J. W. *et al.* Long-Term Liming Improves Soil Fertility and Soybean Root Growth, Reflecting Improvements in Leaf Gas Exchange and Grain Yield. **European Journal of Agronomy**, v. 128, p. 126308, aug. 2021b.
- BOSSOLANI, J. W. *et al.* Soybean in Crop Rotation with Maize and Palisade Grass Intercropping Enhances the Long-Term Effects of Surface Liming in No-till System. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 119–130, 1 mar. 2021a.
- BOUVIER, F. *et al.* Oxidative Tailoring of Carotenoids: A Prospect towards Novel Functions in Plants. **Trends in Plant Science**, v. 10, n. 4, p. 187–194, apr. 2005.

BOVERIS A. *et al.* Measurement of superoxide radical and hydrogen peroxide production in isolated cells and subcellular organelles. **Methods Enzymol**, v. 349, p. 280-287, 2002.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248–254, 1976.

BRITO, D. S. *et al.* Effects of Aluminum on the External Morphology of Root Tips in Rice. **Brazilian Journal of Botany**, v. 43, n. 3, p. 413–418, 1 sep. 2020.

CARTER, G. A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 3, p. 697–703, 1 feb. 1994.

CHANCE, B.; MAEHLY, A. C. Assay of Catalase and Peroxidase. **Methods in Enzymology**, v. 2, p. 764-775, 1955.

ČIAMPOROVÁ, M. Morphological and Structural Responses of Plant Roots to Aluminium at Organ, Tissue, and Cellular Levels. **Biologia plantarum**, v. 45, n. 2, p. 161–171, 1 jun. 2002.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 11 décimo primeiro levantamento, aug. 2024.

COSTA, C. H. M. *et al.* Intensive Annual Crop Production and Root Development in a Tropical Acid Soil under Long-Term No-till and Soil Amendment Management. **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 5, p. 488, 2018.

COSTA, C. H. M. da; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119–132, 1 mar. 2016.

CRISPINO, C. C. *et al.* **Adubação Nitrogenada na Cultura da Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. (Comunicado Técnico, 75).

DEMMIG-ADAMS, B.; STEWART, J. J.; ADAMS, W. W. Multiple feedbacks between chloroplast and whole plant in the context of plant adaptation and acclimation to the environment. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 369, n. 1640, p. 20130244, 19 apr. 2014.

EL AMRANI, B. Nutrient Transporters as Plant Strategy to Adapt to Nutrient Fluctuations in the Soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 19, p. 3272–3283, 25 nov. 2024.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. *In: Advances in Agronomy*. Academic Press, 2008. 99p. 345–399.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The Role of Mineral Nutrition on Root Growth of Crop Plants. *In: Advances in Agronomy*. Elsevier, 2011. 110p. 251–331.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. *In: Advances in Agronomy*. Elsevier, 2014. 128p. 221–275.

FEHR, W. R. *et al.* Stage of Development Descriptions for Soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill 1. **Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 929-931, 1971.

FERNIE, A. R. *et al.* Fructose 2, 6-bisphosphate activates pyrophosphate: fructose-6-phosphate 1-phosphotransferase and increases triose phosphate to hexose phosphate cycling in heterotrophic cells. **Planta**, v. 212, n. 2, p. 250-263, 2001.

FLEXAS, J. *et al.* Mesophyll conductance to CO₂: current knowledge and future prospects. **Plant, Cell & Environment**, v. 31, n. 5, p. 602-621, 2008.

GAY C.; GEBICKI, J.M. A critical evaluation of the effect of sorbitol on the ferric-xylenol orange hydroperoxide assay. **Analytical Biochemistry**, v. 284, p. 217-220, 2000.

GUO, B. *et al.* Soybean Genetic Resources Contributing to Sustainable Protein Production. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 135, n. 11, p. 4095–4121, nov. 2022.

HASAN, Md. M. *et al.* Regulation of Phosphorus Uptake and Utilization: Transitioning from Current Knowledge to Practical Strategies. **Cellular & Molecular Biology Letters**, v. 21, n. 1, p. 7, dec. 2016.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, p. 189-198, 1968.

HOLLAND, J. E. *et al.* Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science of The Total Environment**, v. 610–611, p. 316–332, 1 jan. 2018.

HOLT, N. E. *et al.* Carotenoid Cation Formation and the Regulation of Photosynthetic Light Harvesting. **Science**, v. 307, n. 5708, p. 433–436, 21 jan. 2005.

JIN, J.; WANG, Q.; ZHUANG, J. Coupling Light Intensity and Hyperspectral Reflectance Improve Estimations of the Actual Electron Transport Rate of Mango Leaves (*Mangifera indica* L.). **Remote Sensing**, v. 16, n. 18, p. 3523, jan. 2024.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. McGraw-Hill Books: New York, 1940, 523 p.

KACHIGUMA, A.; TINDWA, H.; MREMA, J. Incubation of Soil with Agricultural Lime and Phosphorus Enhances Biological Nitrogen Fixation and Yield of Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in an Ultisol. **Journal of Central European Agriculture**, v. 20, n. 3, p. 938–952, 2019.

KARUPPANAPANDIAN, T. *et al.* Reactive Oxygen Species in Plants: Their Generation, Signal Transduction, and Scavenging Mechanisms. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 709–725, 2011.

KASAI, M. Regulation of Leaf Photosynthetic Rate Correlating with Leaf Carbohydrate Status and Activation State of Rubisco under a Variety of Photosynthetic Source/Sink Balances. **Physiologia Plantarum**, v. 134, n. 1, p. 216–226, sep. 2008.

KHAN, M. A.; CASTRO-GUERRERO, N. A.; MENDOZA-COZATL, D. Moving toward a Precise Nutrition: Preferential Loading of Seeds with Essential Nutrients over Non-Essential Toxic Elements. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, 20 feb. 2014.

KIRKBY, E. Introduction, Definition and Classification of Nutrients. *In*: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 3–5.

KRAMER, D. M. *et al.* New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes. **Photosynthesis Research**, v. 79, p. 209–218, 2004.

KUKACHKA, B. F., MILLER R. B. A chemical spot-test for aluminum and its value in wood identification. **IAWA Journal**, v. 1, p. 104-109, 1980.

KUMAR, A. *et al.* Soil Pollution and Plant Efficiency Indices for Phytoremediation of Heavy Metal(Loid)s: Two-Decade Study (2002–2021). **Metals**, v. 12, n. 8, p. 1330, aug. 2022.

KUO, M.C.; KAO, C.H. Aluminium effects on lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities in rice leaves. **Biologia Plantarum**, v. 46, p. 149-152, 2003.

LICHTENTHALER, H. K.; WELLBURN, A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, v. 11, n. 5, p. 591–592, oct. 1983.

LISEC, J. *et al.* Gas chromatography mass spectrometry–based metabolite profiling in plants. **Nature Protocols**, v. 1, n. 1, p. 387-396, 2006.

LU, Z. *et al.* Nutrient Limitations on Photosynthesis: From Individual to Combinational Stresses. **Trends in Plant Science**, p. S1360138525000664, apr. 2025.

MAHDI, S. S.; HASSAN, G. I.; HUSSAIN, A. Phosphorus Availability Issue- Its Fixation and Role of Phosphate Solubilizing Bacteria in Phosphate Solubilization. **Research Journal of Agricultural Sciences**, v. 2, p. 174–179, 2011.

MARQUARDT, A.; HENRY, R. J.; BOTHA, F. C. Effect of Sugar Feedback Regulation on Major Genes and Proteins of Photosynthesis in Sugarcane Leaves. **Plant physiology and biochemistry**, v. 158, p. 321–333, jan. 2021.

MENG, C. *et al.* Global Soil Acidification Impacts on Belowground Processes. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 7, p. 074003, 1 jul. 2019.

MINATO, E. A. *et al.* Lime and Gypsum Application to Low-Acidity Soils: Changes in Soil Chemical Properties, Residual Lime Content and Crop Agronomic Performance. **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105860, oct. 2023.

MITTLER, R. Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405–410, 1 sep. 2002.

MOHAMMADI, M.; KARR, A. L. Superoxide anion generation in effective and ineffective soybean root nodules. **J Plant Physiol**, v. 158, p. 1023-1029, 2001.

MOREIRA, A. *et al.* Differential response of soybean genotypes to two lime rates. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, n. 9, p. 1281–1291, 29 jul. 2017.

MOREIRA, S. G. *et al.* Deep Incorporation of High Limestones Rates Affects the Macro and Micronutrients Availability and the Accumulated Grain Yield in Three Acidic Sites in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 154, p. 127074, mar. 2024.

NELWAMONDO, A. M.; MAAZA, M.; MOHALE, K. C. Symbiotic Nitrogen Fixation and Nutrient Acquisition of Three Groundnut Genotypes Exposed to Different Concentrations of Magnesium Oxide and Calcium Carbonate Nanoparticles. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 59, p. 103246, jul. 2024.

NERI, A. V. **Gradiente pedológico-vegetacional de Cerrado em Paraopeba, MG**. 2007. Tese (Doutorado em Botânica), Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2007.

NORA, D. D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393–1403, 2013.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of Soil Acidity in No-Tillage System for Soybean Production. **Soil and Tillage Research**, v. 38, n. 1–2, p. 47–57, aug. 1996.

PATHAN, S. M. *et al.* Genetic Mapping and Confirmation of Quantitative Trait Loci for Seed Protein and Oil Contents and Seed Weight in Soybean. **Crop Science**, v. 53, n. 3, p. 765–774, 2013.

PEIXOTO, P. H. P. *et al.* Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Rev Bras Fisiol Veg**, v. 11, p. 137–143, 1999.

PENG, W. T. *et al.* Magnesium Promotes Root Nodulation through Facilitation of Carbohydrate Allocation in Soybean. **Physiologia Plantarum**, v. 163, n. 3, p. 372–385, jul. 2018.

PENG, W. T. *et al.* Magnesium Supports Nitrogen Uptake through Regulating NRT2.1/2.2 in Soybean. **Plant and Soil**, v. 457, n. 1–2, p. 97–111, dec. 2020.

PINNOLA, A.; BASSI, R. Molecular mechanisms involved in plant photoprotection. **Biochem Soc Trans**, v. 46, n. 2, p. 467-482, 17 apr. 2018.

PODAR, D.; MAATHUIS, F. J. M. Primary Nutrient Sensors in Plants. **iScience**, v. 25, n. 4, p. 104029, apr. 2022.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG, 1999.

RIBEIRO, C. *et al.* Aluminum Promotes Changes in Rice Root Structure and Ascorbate and Glutathione Metabolism. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 28, n. 11–12, p. 2085–2098, dec. 2022.

ROCHAIX, J.-D. Regulation of Photosynthetic Electron Transport. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1807, n. 3, p. 375–383, mar. 2011.

ROSA, V. do R. *et al.* Growth, development, and photosynthetic performance of two soybean lineages in response to drought. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 547–553, 2022.

SEVERO SANTOS, J. F.; NAVAL, L. P. Spatial and Temporal Dynamics of Water Footprint for Soybean Production in Areas of Recent Agricultural Expansion of the Brazilian Savannah (Cerrado). **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119482, apr. 2020.

SHAH, S. H.; HOUBORG, R.; MCCABE, M. F. Response of Chlorophyll, Carotenoid and SPAD-502 Measurement to Salinity and Nutrient Stress in Wheat (*Triticum aestivum* L.). **Agronomy**, v. 7, n. 3, p. 61, sep. 2017.

SHARMA, P. *et al.* Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, n. 1, p. 217037, 2012.

SHI, Q. *et al.* Phosphorus-Fertilisation Has Differential Effects on Leaf Growth and Photosynthetic Capacity of *Arachis hypogaea* L. **Plant and Soil**, v. 447, n. 1, p. 99–116, feb. 2020.

SILVA, C. O. *et al.* Modulation of the Antioxidant System and Primary Metabolism Confers Aluminum Stress Tolerance in Soybean. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 45, n. 6, p. 77, jun. 2023.

SINGH, S. K.; REDDY, V. R. Potassium Starvation Limits Soybean Growth More than the Photosynthetic Processes across CO₂ Levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 8 jun. 2017.

SOARES, J. M. *et al.* Near-Infrared Spectral Evaluation of Physiological Potential, Biochemical Composition and Enzymatic Activity of Soybean Seeds. **Journal of Seed Science**, v. 46, p. e202446037, 2024.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; MELLO, F. F. de C. Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo. **Bragantia**, v. 69, p. 965–974, dec. 2010.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUSA, A. *et al.* Oxidative Metabolism of Rye (*Secale cereale* L.) after Short Term Exposure to Aluminum: Uncovering the Glutathione–Ascorbate Redox Network. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 24 may 2016.

SPEROTTO, R. A. *et al.* From Soil to Seed: Micronutrient Movement into and within the Plant. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, sep. 2014.

STREB, S.; ZEEMAN, S. C. Starch Metabolism in Arabidopsis. **The Arabidopsis Book**, v. 10, p. e0160, jan. 2012.

TEDESCO, M, J, C. *et al.* **Analysis of soil, Plants and other materials**. 2. ed. Porto Alegre, Brazil: Department of soil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 174 p.

TRABAQUINI, K. *et al.* Soil, Land Use Time, and Sustainable Intensification of Agriculture in the Brazilian Cerrado Region. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 2, p. 70, 23 jan. 2017.

VASCONCELOS, C. V. *et al.* Potential of Calcium Nitrate to Mitigate the Aluminum Toxicity in Phaseolus Vulgaris: Effects on Morphoanatomical Traits, Mineral Nutrition and Photosynthesis. **Ecotoxicology**, v. 29, n. 2, p. 203–216, 1 mar. 2020.

VEGA, J. J. de *et al.* Differential expression of starch and sucrose metabolic genes linked to varying biomass yield in Miscanthus hybrids. **Biotechnology for Biofuels**, v. 14, n. 1, p. 98, 19 apr. 2021.

VIEIRA FONTOURA, S. M. *et al.* Effect of Gypsum Rates and Lime with Different Reactivity on Soil Acidity and Crop Grain Yields in a Subtropical Oxisol under No-Tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27–41, oct. 2019.

WANG, H.; INUKAI, Y.; YAMAUCHI, A. Root Development and Nutrient Uptake. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 25, n. 3, p. 279–301, jul. 2006.

WANG, G. *et al.* Effects of Reduced Chlorophyll Content on Photosystem Functions and Photosynthetic Electron Transport Rate in Rice Leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 272, p. 153669, may 2022.

WANG, Q. *et al.* The Utilization and Roles of Nitrogen in Plants. **Forests**, v. 15, n. 7, p. 1191, jul. 2024.

XU, X. *et al.* Effects of Potassium Levels on Plant Growth, Accumulation and Distribution of Carbon, and Nitrate Metabolism in Apple Dwarf Rootstock Seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 23 jun. 2020.

YEMM, E.W. *et al.* The determination of amino-acids with ninhydrin. **The Analyst**, v. 80, p. 209–214, 1955.

YLIVAINIO, K. *et al.* Liming Improves Wheat Nutrient Use Efficiency, Yield, and Quality on Acid Soils in Ethiopia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 129, n. 2, p. 167–183, oct. 2024.

ZHAO, J. *et al.* Manganese Toxicity Inhibited Root Growth by Disrupting Auxin Biosynthesis and Transport in Arabidopsis. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 3 mar. 2017.

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Tabela 1. Análise química do solo nativo do Cerrado, do solo sem calagem (NL) com adubação e do solo com calagem (L) com adubação antes do plantio e após a colheita da soja.

		pH	N	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	Cu	Mn	Fe	Zn	Al ³⁺
			dag kg ⁻¹				mg dm ⁻³						cmol dm ⁻³
Flona soil		4,84	0,140	2,6	92	0,41	0,29	12,1	0,87	15,2	86,4	1,45	2,39
Pre- harvest	NL	4,20	0,140	213,9	259	6,05	0,36	620,0	13,81	27,4	90,3	42,18	1,02
	L	5,34	0,134	278,9	285	9,74	1,20	595,6	17,92	28,1	80,0	64,80	0,06
	NL	4,08	0,138	118,5	113	7,10	0,54	401,0	10,05	33,9	88,9	28,38	1,08
	L	5,27	0,144	167,3	111	9,68	1,49	447,0	13,19	20,0	63,2	38,28	0,06

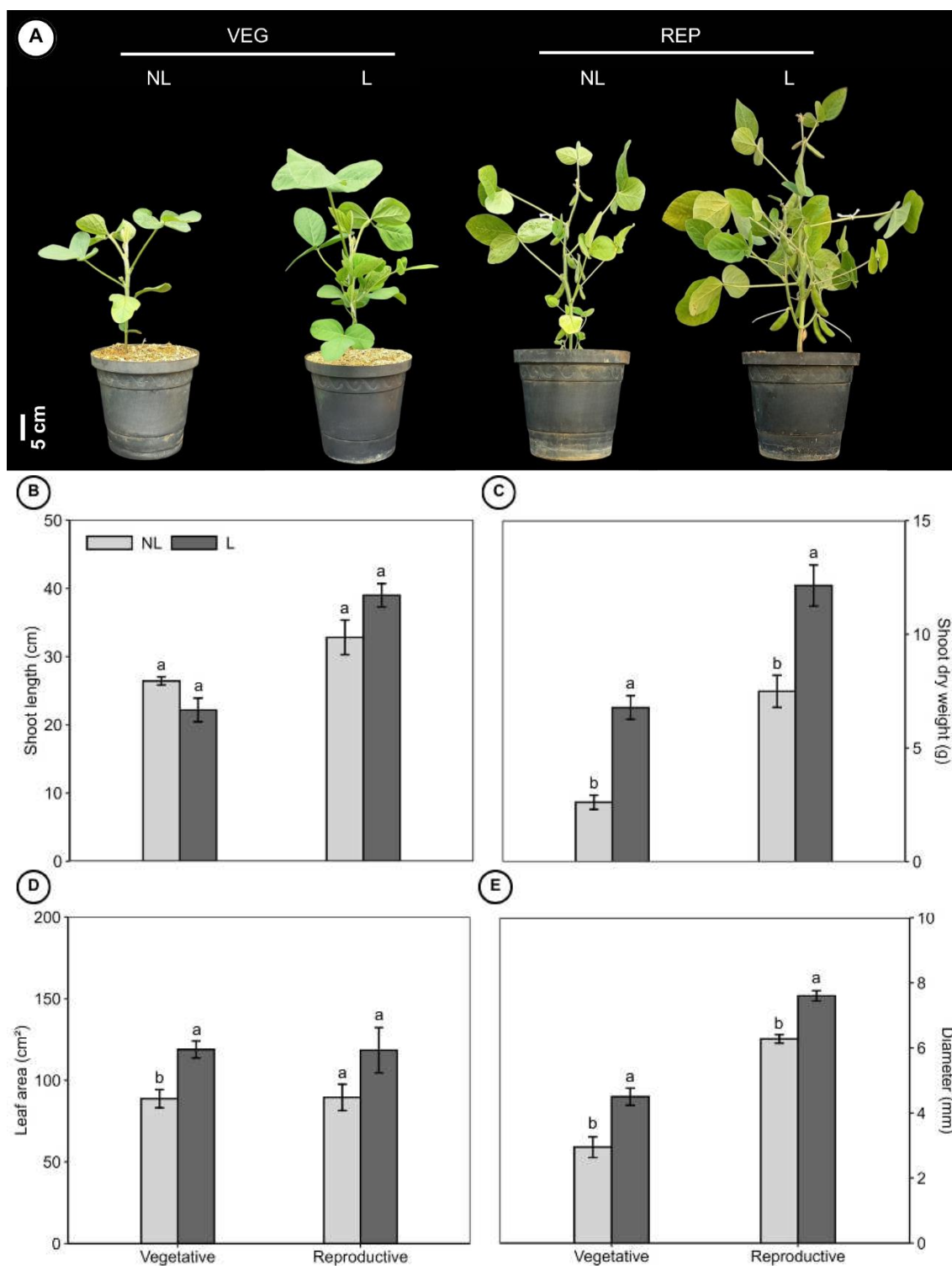


Figura 1. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea de soja cultivada em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Fenótipo (A); comprimento da parte aérea (B); massa seca da parte aérea (C); área foliar total (D); e diâmetro do caule (E). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=4$).

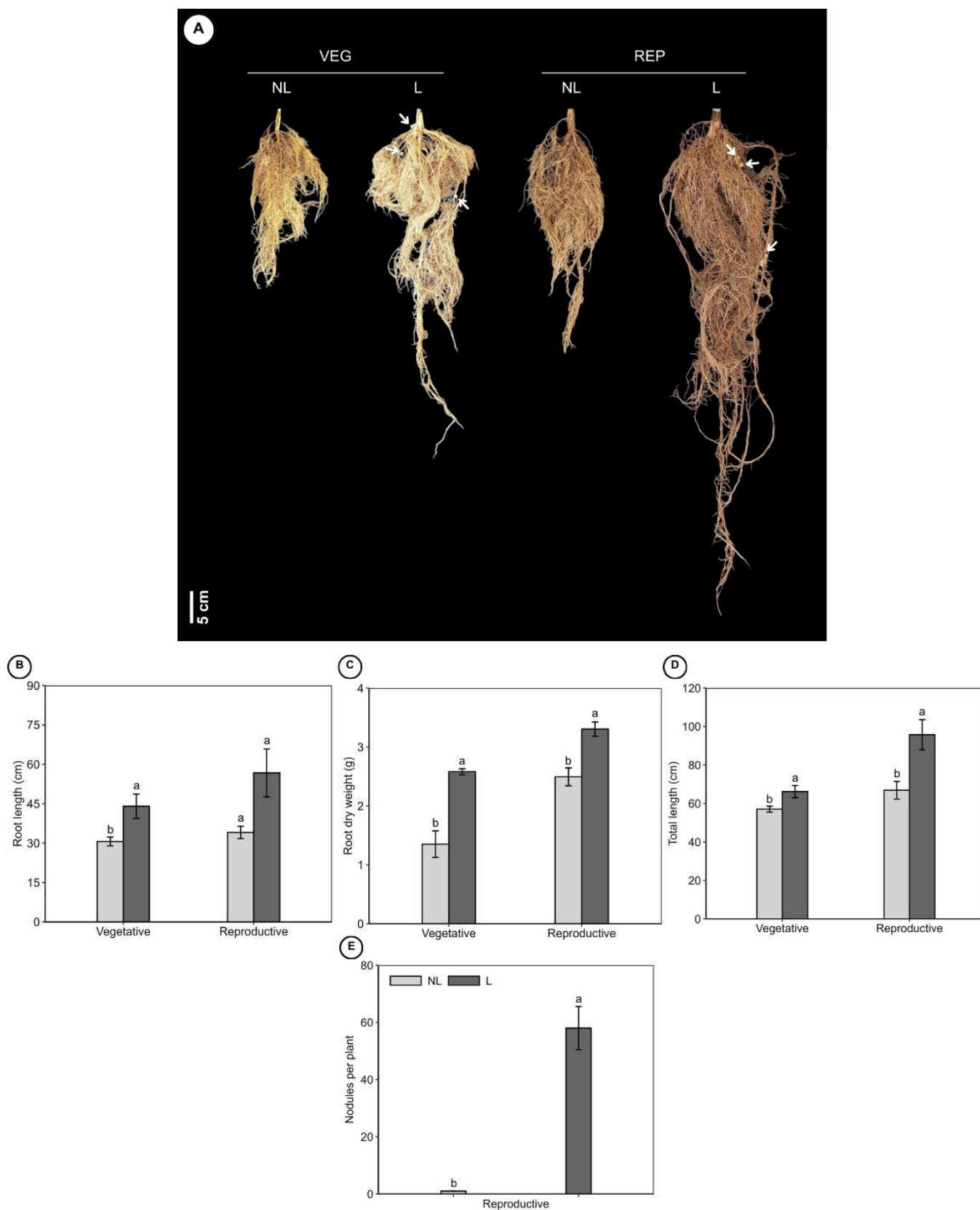


Figura 2. Crescimento e desenvolvimento do sistema radicular de soja cultivada em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Fenótipo do sistema radicular (A); comprimento da raiz (B); massa seca da raiz (C); comprimento total da planta (D); número médio de nódulos por planta (E). Setas brancas indicam presença de nódulos. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=4$).

Tabela 2. Acúmulo de macro e micronutrientes e de alumínio (Al) na parte aérea (S) ou sistema radicular (R) de plantas de soja no estágio vegetativo V3 (Veg) e reprodutivo R5 (Rep), após cultivo em solo sem (NL) ou com calagem (L). Fator de translocação (TF).

		N		P		K		Ca		Mg		Cu		Fe		Zn		Mn		Al		
		mg organ ⁻¹																				
		S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	
TF	Veg	NL	55	32,41	8,20	4,01	65,54	49,69	39,37	3,17	10,88	1,90	0,02	0,02	0,28	1,73	1,29*	1,67	1,48	0,001	0,40	3,27
		L	108,44*	37,17	22,40*	8,55*	156,64*	76,08*	116,75*	8,83*	33,73*	31,85*	0,03*	0,03	0,65	11,13*	0,55	0,52	0,29	0,001	0,64	17,23*
	Rep	NL	72,98	50,99*	18,24	10,44*	117,91	65,98	124,08	8,70	23,36	3,04	0,04	0,07*	0,70	6,48	5,79*	4,49*	7,50*	0,011*	1,9	12,98
		L	171,46*	34,99	22,63	4,74	148,08	71,32	208,02*	10,83	49,20*	30,99*	0,04	0,03	1,22	8,99*	1,53	0,54	1,09	0,001	1,6	14,21*
	Veg	NL	1,72		2,03		1,33		12,38		5,72*		0,70		0,17*		0,78		774,97*		0,13*	
		L	2,90*		2,76		2,11		13,31		1,06		1,07*		0,05		1,08		218,07		0,03	
	Rep	NL	1,43		1,74		1,93		14,57		8,04*		0,57		0,11		1,44		732,03		0,16	
		L	4,93*		4,84*		2,17		19,50		1,60		1,35*		0,13		3,03*		639,71		0,11	

Valores com asterisco (*) indicam diferença significativa entre os tratamentos para um mesmo órgão pelo teste de Tukey ou Kruskal-Wallis (p <0,05).

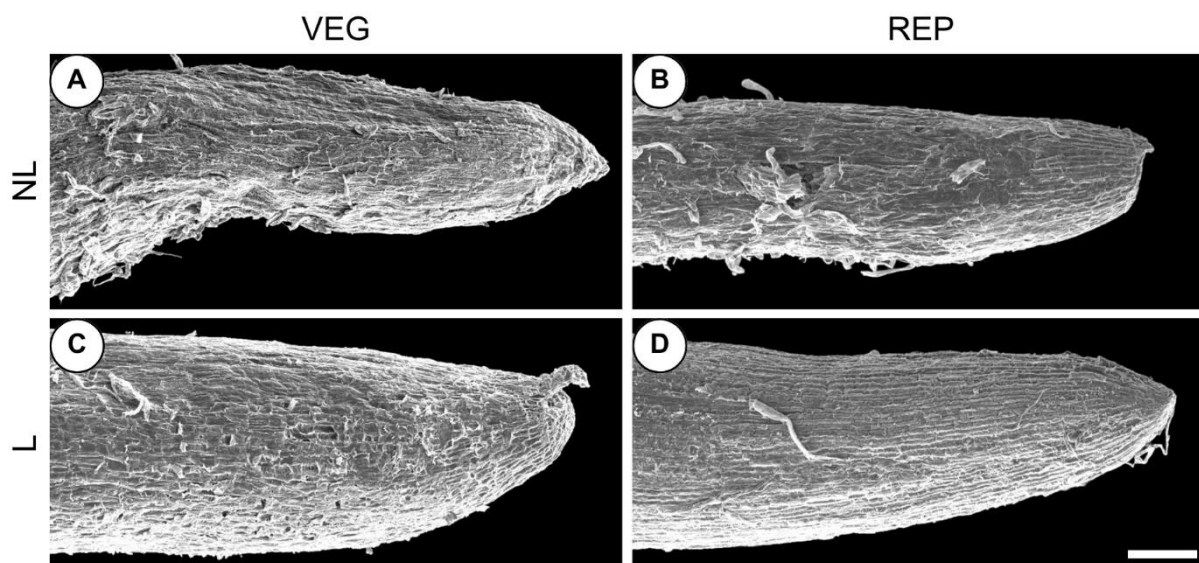


Figura 3. Morfologia externa dos ápices radiculares por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de soja cultivada em solo sem calagem - NL (A, B) e com calagem - L (C, D) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo - V3 (A, C) e Reprodutivo - R5 (B, D). Barra: 100 μ m.

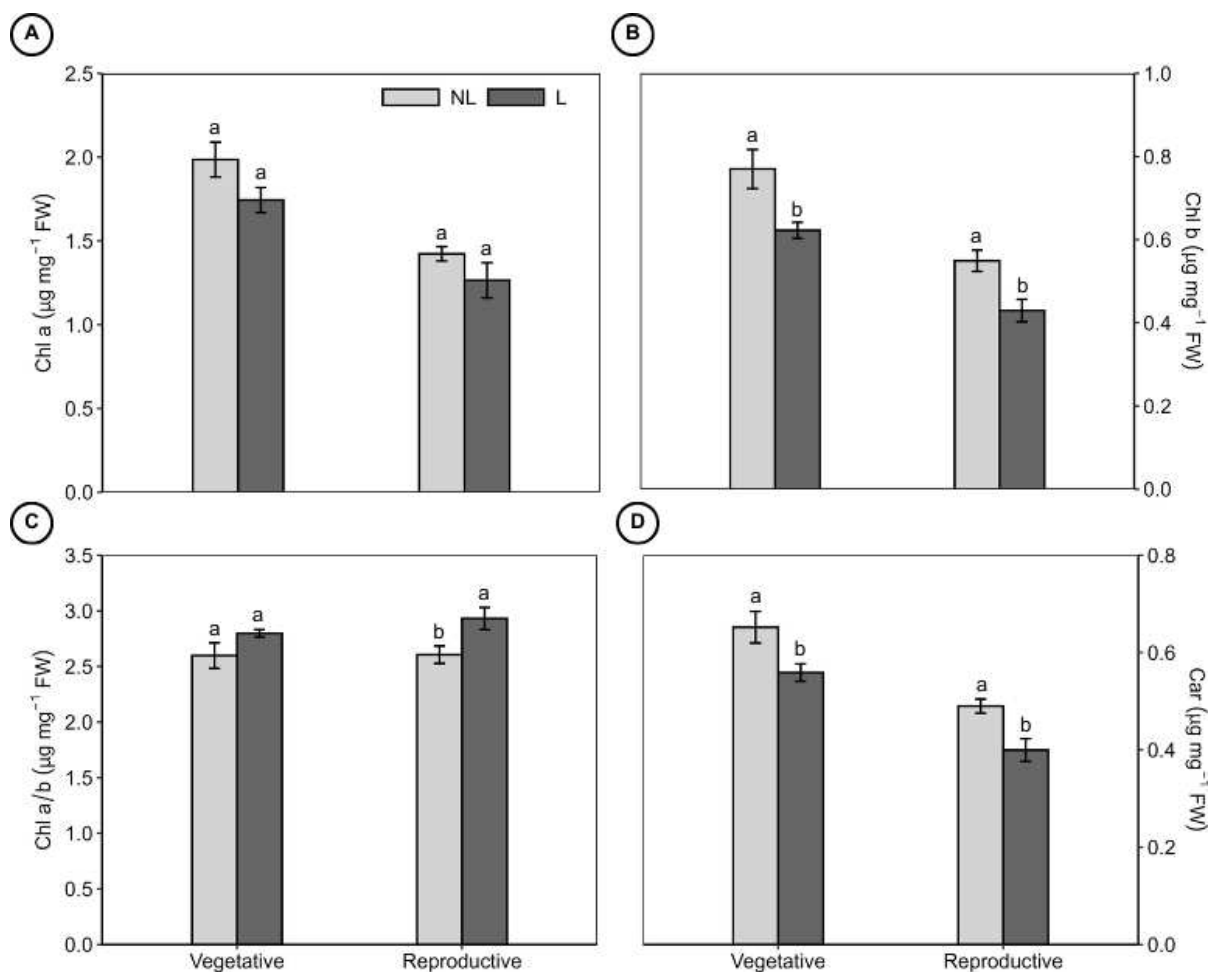


Figura 4. Concentração de clorofila *a* (A); clorofila *b* (B); razão clorofila *a/b* (C); e concentração de carotenoides (D) em folhas de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=6$).

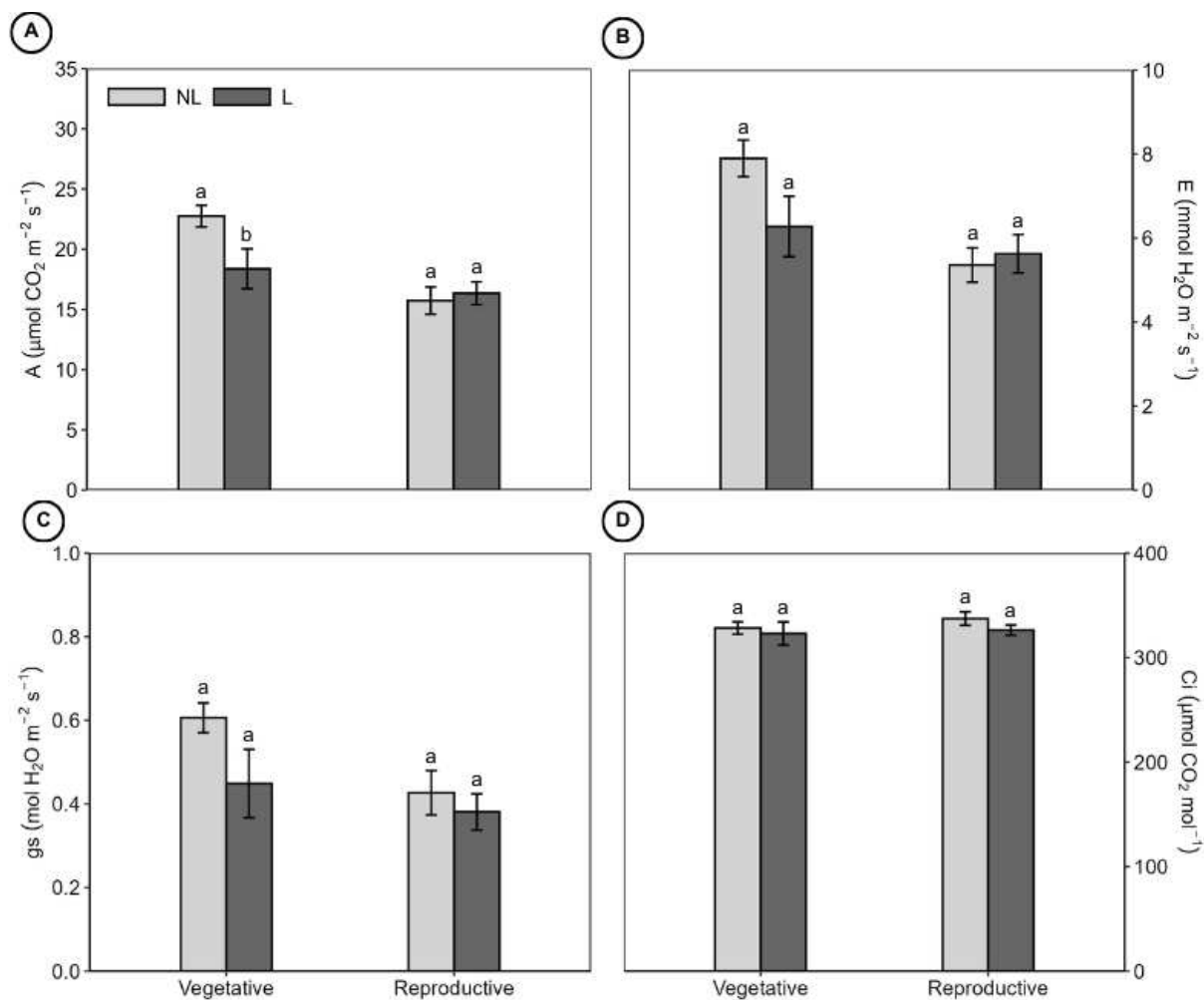


Figura 5. Taxa de fotossíntese líquida (A); transpiração (B); condutância estomática (C); e concentração interna de CO_2 (E) em folhas de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=6$).

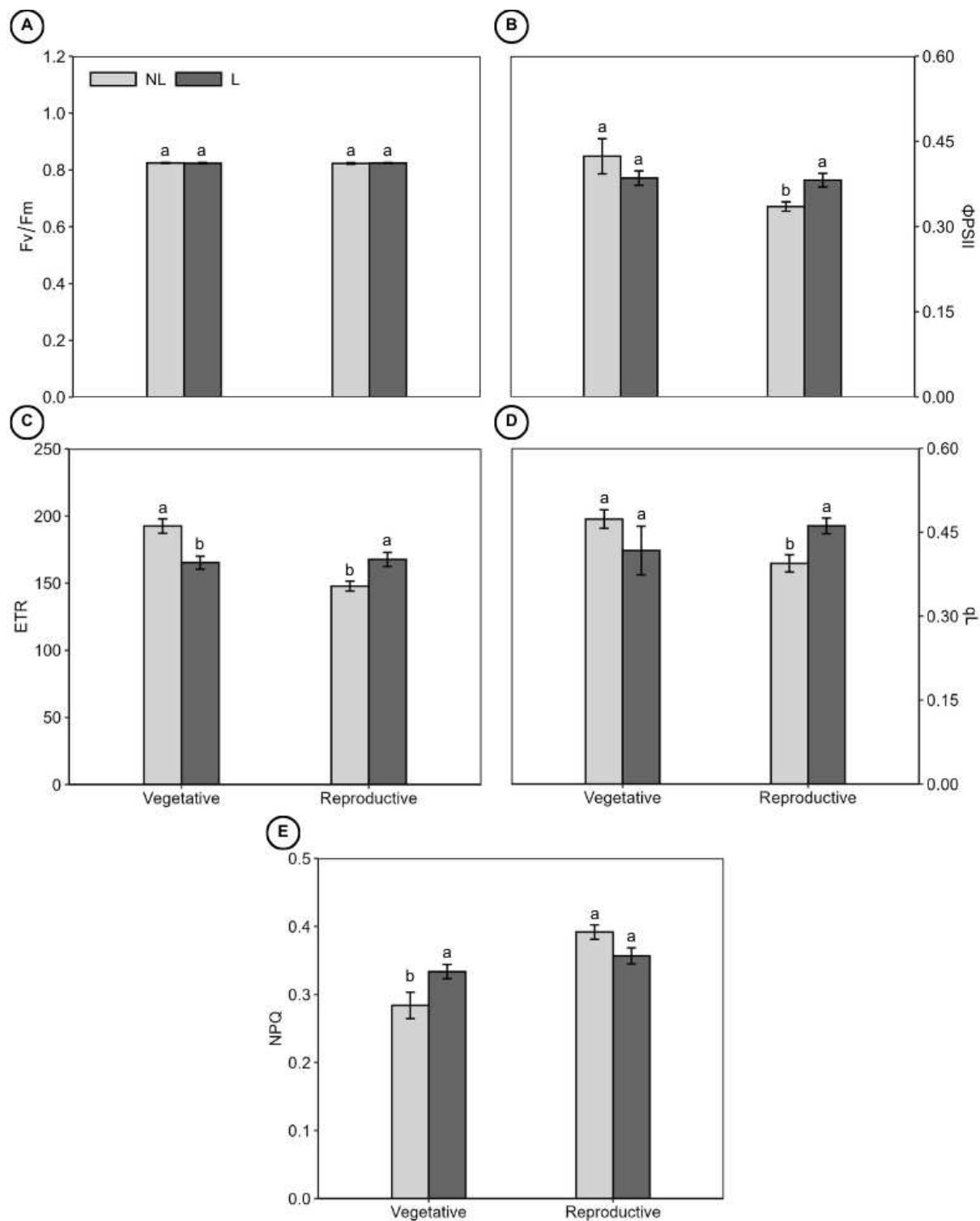


Figura 6. Rendimento quântico potencial do PSII (A); rendimento quântico efetivo do fluxo linear de elétrons pelo PSII (B); taxa de transporte de elétrons (C); estimativa de centros de reações abertos do PSII (D); e rendimento quântico da dissipação regulada de energia (E) em folhas de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=6$).

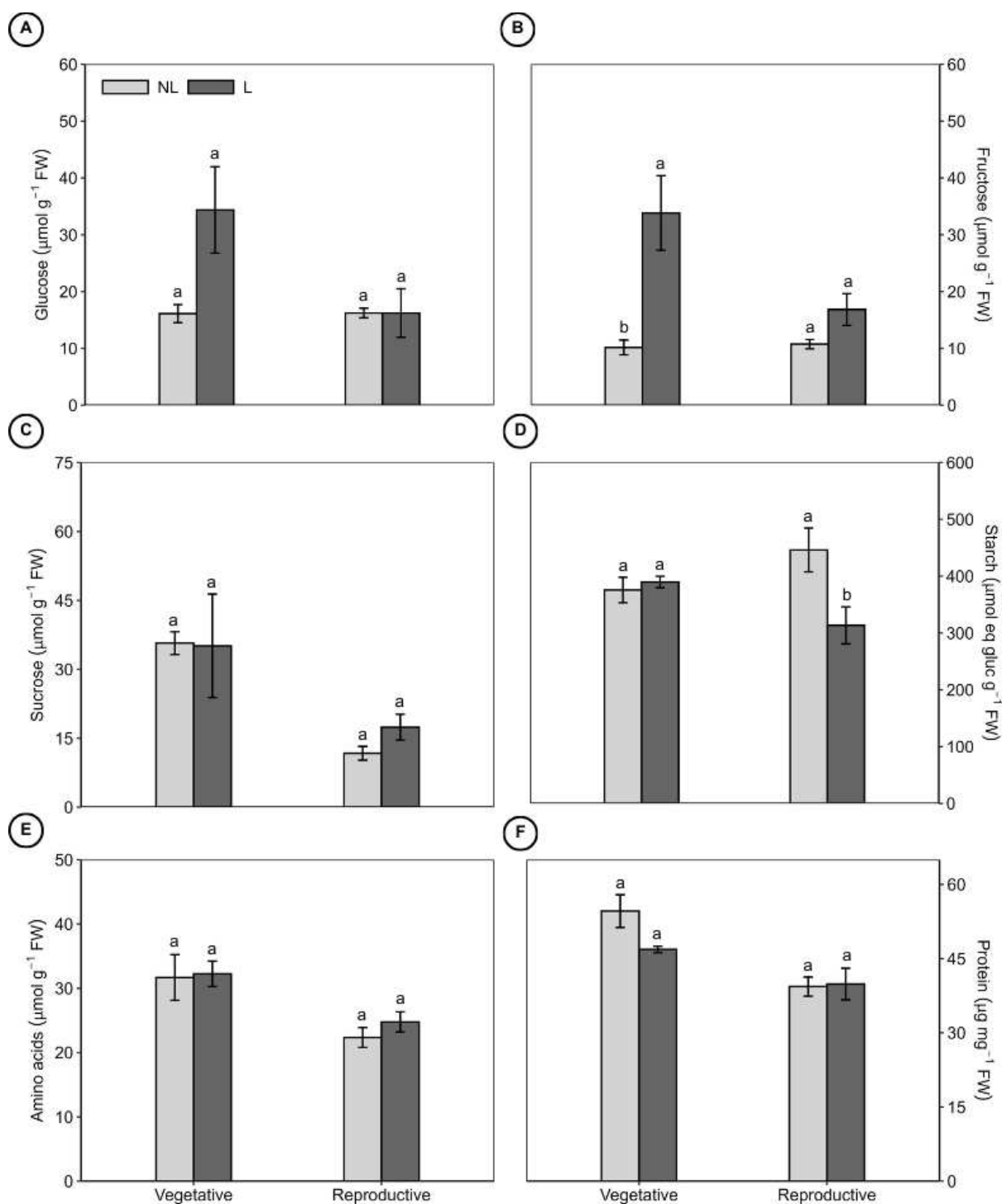


Figura 7. Concentração de glicose (A); frutose (B); sacarose (C); amido (D); aminoácidos totais (E); e proteínas solúveis totais (F) em folhas de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=5$).

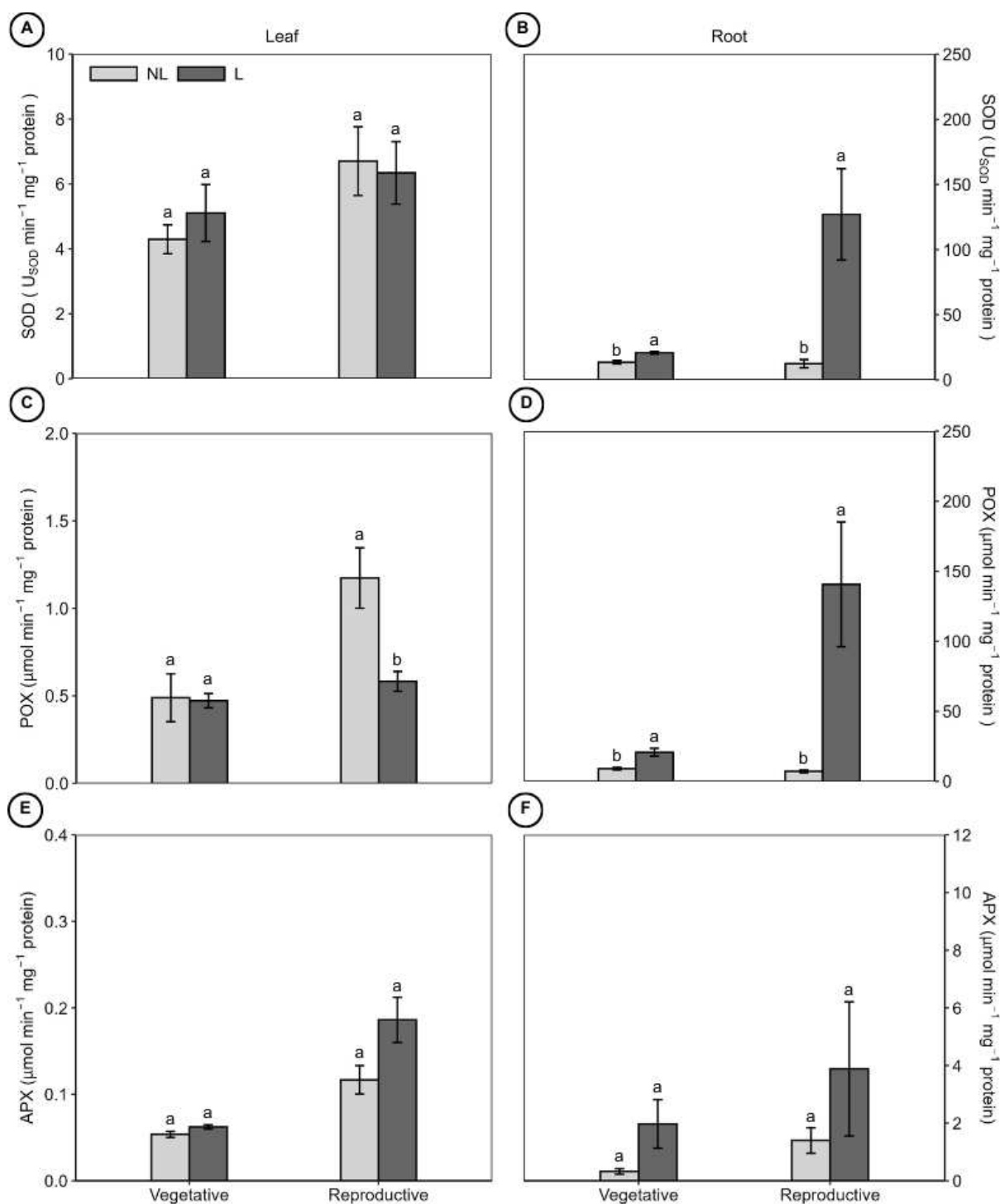


Figura 8. Atividade das enzimas superóxido dismutase – SOD (A-B); peroxidase total – POX (C-D); e peroxidase do ascorbato – APX (E-F) em folhas (A, C e E) e raízes (B, D e F) de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=4$).

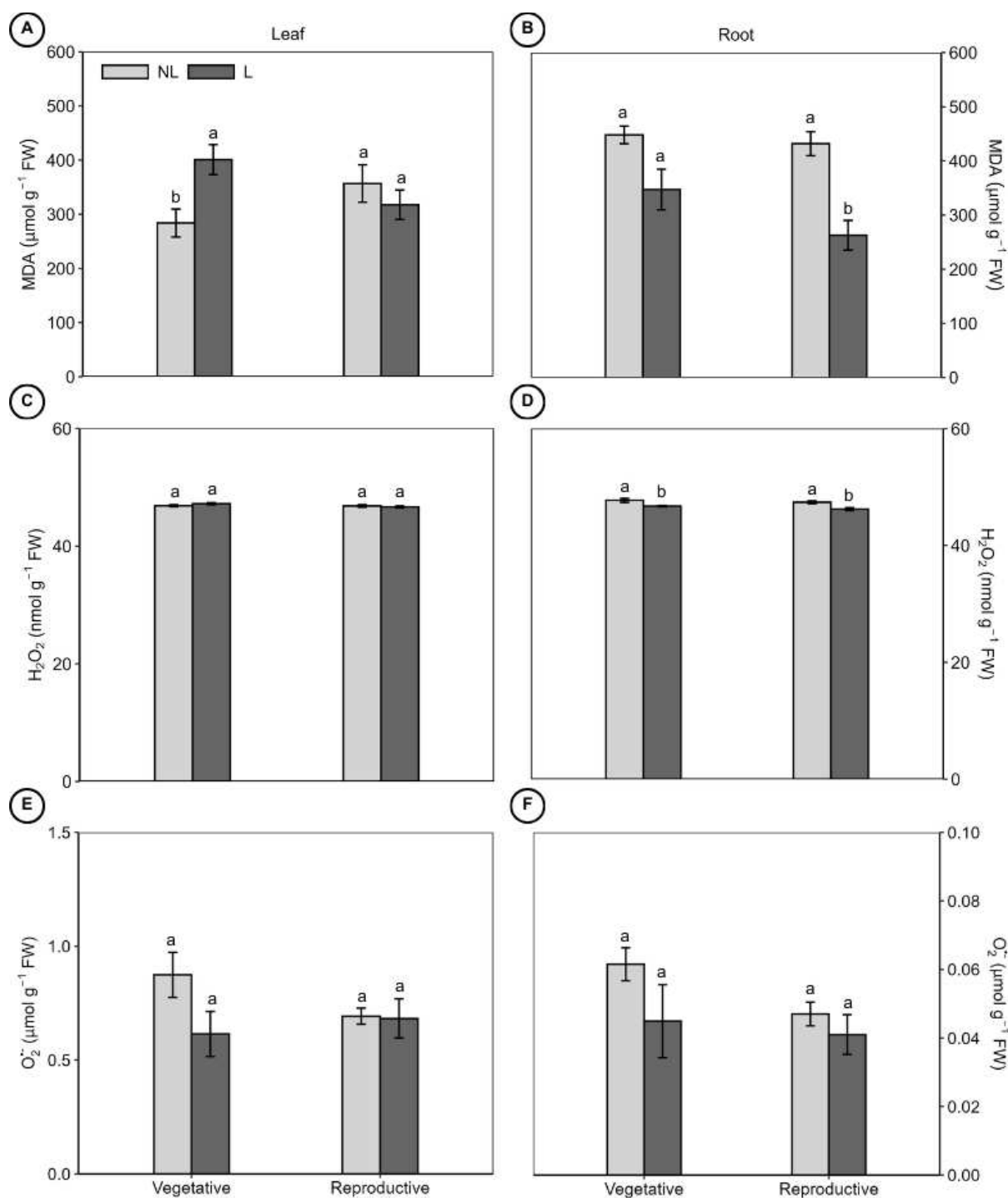


Figura 9. Concentração de peroxidação lipídica – MDA (A-B); concentração de peróxido de hidrogênio – H_2O_2 (C-D); e do radical ânion superóxido – O_2^- (E-F) em folhas (A, C e E) e raízes (B, D e F) de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo (V3) e Reprodutivo (R5). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=5$).

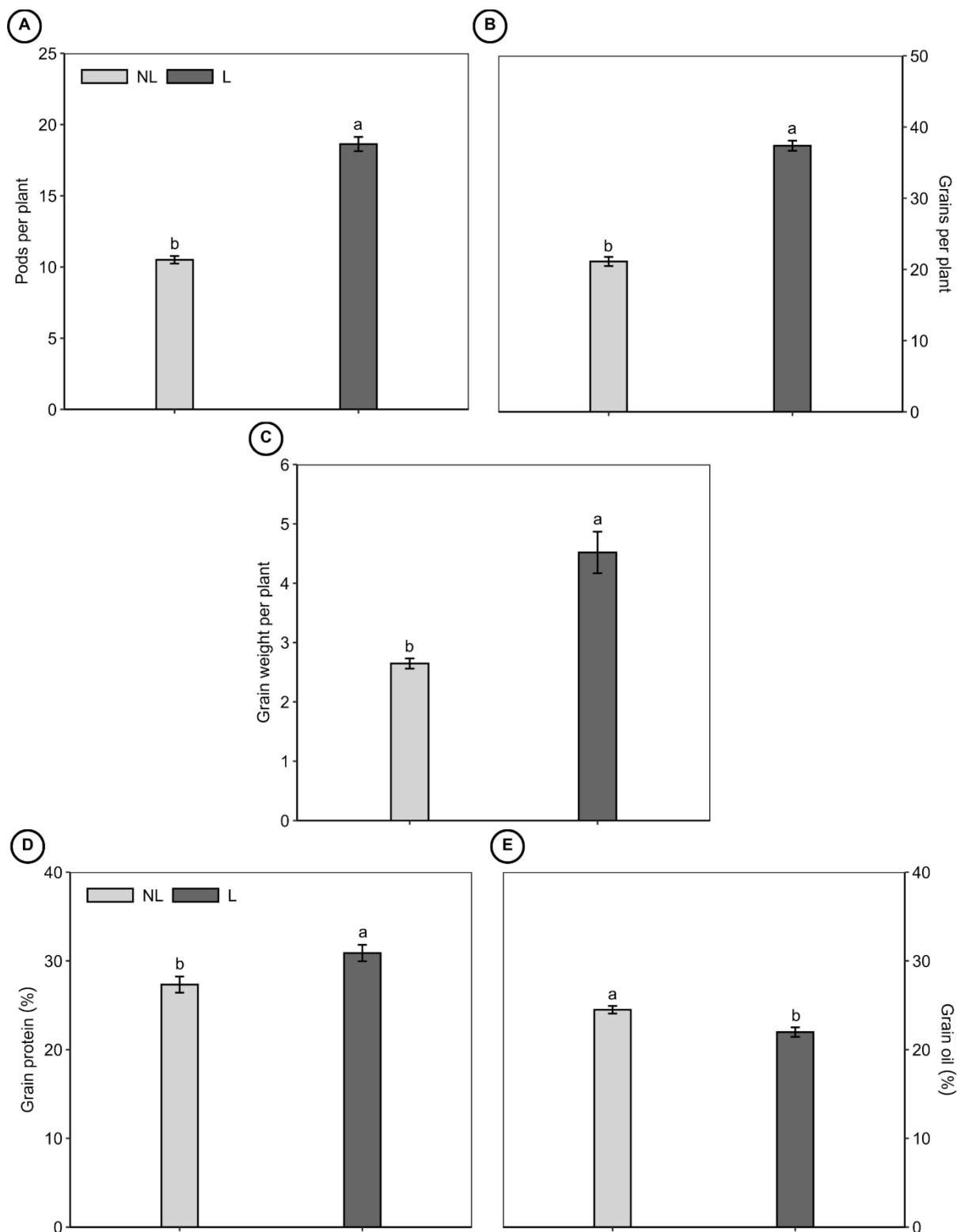


Figura 10. Número de vagens (A); número de grãos por planta (B); peso médio de grãos por planta (C); Porcentagem de proteínas de grãos (D) e porcentagem de óleo de grãos (E) de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) após o estágio de desenvolvimento Reprodutivo (R8). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). Barras representam o erro padrão dos valores médios ($n=8$).

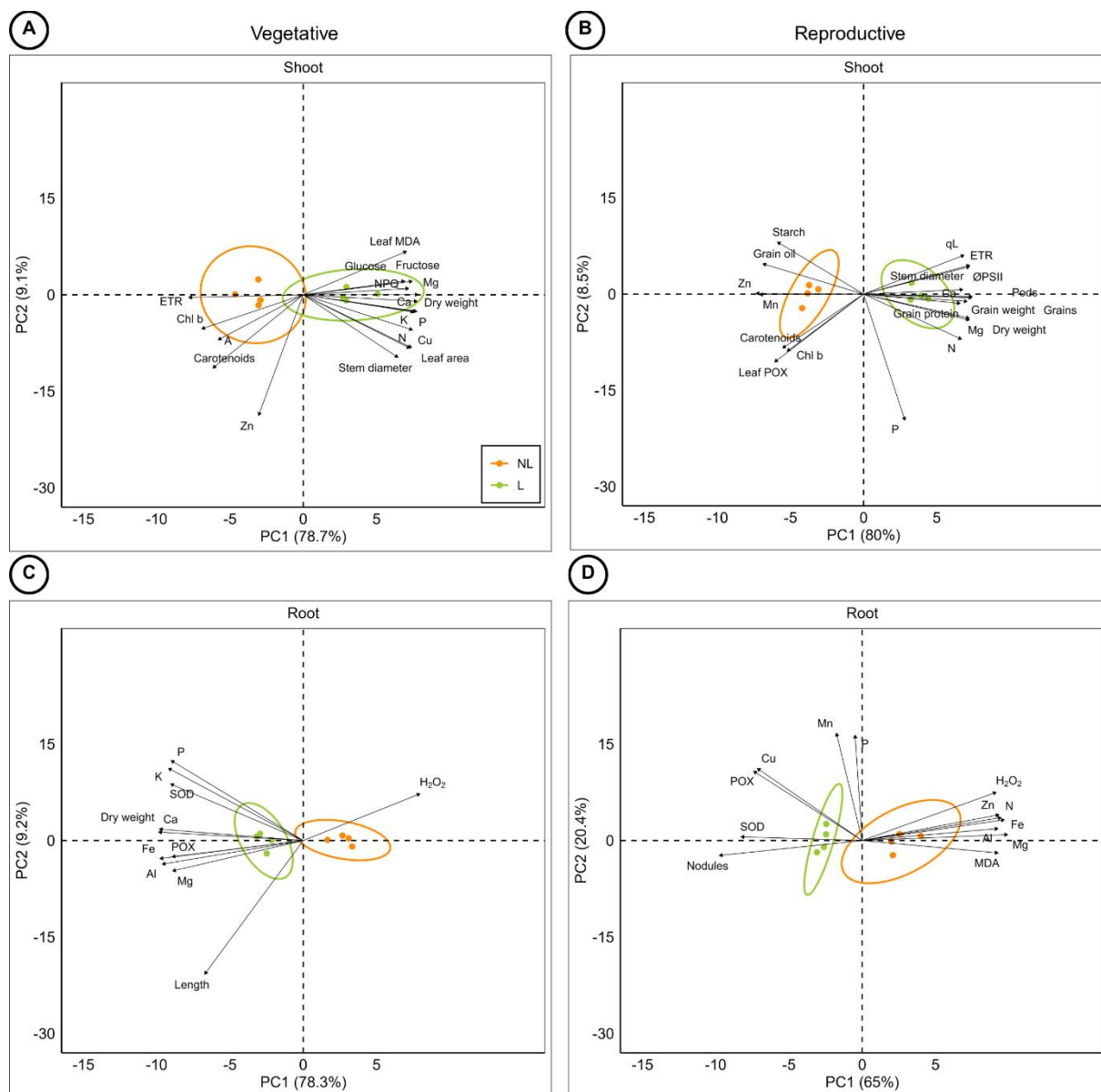


Figura 11. Análise de componente principal (PCA) das características morfofisiológicas e nutricionais da parte aérea (A-B) e raízes (C-D) plantas de soja cultivadas em solo sem (NL) e com calagem (L) durante o estágio de desenvolvimento Vegetativo – V3 (A, C), Reprodutivo – R5 e R8 (B, D). Abreviações: Alumínio (Al); Cálcio (Ca); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Fósforo (P); Magnésio (Mg); Manganês (Mn); Nitrogênio (N); Potássio (K); Zinco (Zn); fotossíntese líquida (A); clorofila *b* (Chl *b*); rendimento quântico efetivo do fluxo linear de elétrons pelo PSII (Φ PSII); taxa de transporte de elétrons (ETR); estimativa de centros de reações abertos do PSII (qL); rendimento quântico da dissipação regulada de energia (NPQ); peroxidase total (POX); superóxido dismutase (SOD); malondialdeído (MDA); peróxido de hidrogênio (H_2O_2).