

UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

**USO POTENCIAL DE ROCHAS CALCÁRIAS COM DIFERENTES
COMPOSIÇÕES QUÍMICAS, INCLUINDO FOLHELHO, COMO
FONTES DE NUTRIENTES NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA
SOJA**

DANIELLE CRISTINA DE OLIVEIRA

Magister Scientiae

RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL
2025

DANIELLE CRISTINA DE OLIVEIRA

**USO POTENCIAL DE ROCHAS CALCÁRIAS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES
QUÍMICAS, INCLUINDO FOLHELHO, COMO FONTES DE NUTRIENTES NO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA**

**Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio
Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de
*Magister Scientiae***

**RIO VERDE
GOIÁS - BRASIL**

2025

Universidade de Rio Verde
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

O46u Oliveira, Danielle Cristina de

Uso potencial de rochas calcárias com diferentes composições químicas, incluindo folhelho, como fontes de nutrientes no desenvolvimento inicial da soja. / Danielle Cristina de Oliveira. – 2025.
49 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin.
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2025.

Inclui biografia.
Inclui índice de tabelas e figuras.

1. Calcário dolomítico. 2. Calagem. 3. Fontes alternativas. 4. *Glycyne max* L. 5. Análises fisiológicas. I. Boldrin, Paulo Fernandes. II. Dias, Ricardo de Castro. III. Título.

CDD: 631.8

Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

DANIELLE CRISTINA DE OLIVEIRA

**USO POTENCIAL DE ROCHAS CALCÁRIAS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES
QUÍMICAS, INCLUINDO FOLHELHO, COMO FONTES DE NUTRIENTES NO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde,
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em
Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVAÇÃO: 10 de dezembro de 2025



Documento assinado digitalmente
PAULO FERNANDES BOLDRIN
Data: 15/12/2025 19:17:14-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin
Presidente da Banca Examinadora
Membro – PPGPV/UniRV



Documento assinado digitalmente
RICARDO DE CASTRO DIAS
Data: 16/12/2025 18:39:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Pesquisador Dr. Ricardo de Castro Dias
Coorientador
Pós-doutorando – ESALQ/USP



Documento assinado digitalmente
DIEGO OLIVEIRA RIBEIRO
Data: 15/12/2025 19:35:34-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Diego Oliveira Ribeiro
Membro Externo – UniFimes



Documento assinado digitalmente
VERIDIANA CARDOZO GONCALVES CANTAO
Data: 15/12/2025 19:30:32-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão
Membro – PPGPV/UniRV



Documento assinado digitalmente
GIVANILDO ZILDO DA SILVA
Data: 19/12/2025 19:56:56-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Givanildo Zildo da Silva
Membro – PPGPV/UniRV

DEDICATÓRIA

A Deus, pela vida e pela força para enfrentar os desafios.

Aos meus amados pais, Vanderlucia e Diniz, verdadeiros pilares da minha jornada. Esta conquista é o reflexo do amor incondicional e da imensa crença que sempre depositaram em mim. O sacrifício e a renúncia de tantas situações, em prol do meu investimento educacional foram a prova mais sublime do vosso apoio, que se estendeu até este momento. Meu eterno agradecimento por serem a minha base.

Em especial, à minha mãe, Vanderlucia, um exemplo inigualável de garra, determinação e propósito. Sua força e resiliência são a minha maior inspiração para trilhar os caminhos e desafios da vida com coragem.

Ao meu esposo, pelo apoio constante, pela paciência e por caminhar lado a lado comigo nesta etapa.

À UNIRV, pela valiosa oportunidade de desenvolvimento e pela confiança, em me permitir explorar e agregar conhecimento em uma área totalmente nova e desafiadora.

Aos professores, que cruzaram o meu caminho, pela dedicação, ensinamentos e contribuições essenciais, para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A jornada até a conclusão deste trabalho foi repleta de desafios, e a gratidão é o sentimento que permeia cada palavra.

A Deus, por ser minha base, força e sustento inabalável. Nos momentos em que a dificuldade se impôs e o desejo de desistir surgiu, a fé foi a âncora que me manteve firme.

À Universidade de Rio Verde (UniRV), pela excelência e pela oportunidade de realização deste curso, que proporcionou um crescimento ímpar.

Ao Professor Orientador, Dr. Paulo Fernandes Boldrin, pela orientação precisa, pelo apoio contínuo e pela confiança na concretização deste projeto.

Ao Professor Coorientador, Dr. Ricardo de Castro Dias e a Professora Dr^a. Juliana Silva Rodrigues Cabral, pela dedicação inestimável, pelo tempo dispensado e pela colaboração essencial na construção e execução deste trabalho.

Aos ilustres membros da banca examinadora, Professora Dr^a. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão, Professor Dr. Givanildo Zildo da Silva e Professor Dr. Diego Oliveira Ribeiro, pelo apoio, pelas contribuições e pela disponibilidade em avaliar este trabalho.

Aos estagiários Felipe Gabriel Fernandes Soares e Antônio Carlos Martins Zawadzki, cuja assistência inestimável, dedicação e competência foram cruciais na implantação, condução e colheita dos dados deste experimento, o empenho de ambos foi fundamental para o sucesso desta pesquisa.

A todos os professores e funcionários da pós-graduação da Universidade de Rio Verde, pelo suporte administrativo e acadêmico.

A todos os servidores da Universidade de Rio Verde que, de alguma forma, contribuíram com o apoio e logística necessários, para a realização deste projeto.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram e participaram desta conquista, expresso minha profunda e sincera gratidão.

BIOGRAFIA

Danielle Cristina de Oliveira é mestranda em Produção Vegetal, com ênfase em Solos, pela Universidade de Rio Verde (UniRV), com término previsto para dezembro de 2025. Graduiu-se em Gestão da Qualidade pela Faculdade Cruzeiro do Sul em 2022 e em Engenharia Química, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) em 2017. Possui certificação Green Belt, com experiência consolidada em gestão da qualidade e processos industriais.

Atualmente, atua como Analista de Sistema de Gestão Integrado PL na Cooperativa COMIGO, local em que é responsável pela elaboração e revisão de documentos técnicos, gestão da qualidade em unidades de beneficiamento e laboratórios de análise de sementes e análises industriais relacionadas à grãos, fertilizantes, rações e demais produtos destinados à alimentação animal, acompanhamento de legislações aplicáveis ao agronegócio, treinamentos de colaboradores e implantação de programas de qualidade e segurança de alimentos. Também participa de auditorias internas e externas, certificações internacionais (GMP+, ISO 9001, ISO 17025, IN 29) e promove a melhoria contínua dos processos industriais da cooperativa.

Anteriormente, trabalhou por quase quatro anos como Analista de Qualidade na VIDEPLAST, com foco na produção de embalagens plásticas flexíveis e implementação da certificação IFS PacSecure. Atuou também como Analista da Garantia da Qualidade Jr na BRF S.A., com experiência em abatedouros frigoríficos e legislações HALAL. Durante sua formação acadêmica, realizou estágio no Laboratório de Catálise da UFRRJ, desenvolvendo processos catalíticos e aplicando técnicas avançadas de caracterização de amostras.

Além disso, foi empresária júnior na Núcleo Consultoria, por três anos, desenvolvendo projetos na área de gestão e qualidade, aplicando ferramentas como PDCA, SWOT, 5S e 5W2H, além de liderar equipes e organizar eventos e treinamentos. Sua trajetória combina sólida formação acadêmica, com ampla experiência prática em gestão da qualidade, processos industriais e pesquisa aplicada, refletindo seu compromisso com inovação, eficiência e sustentabilidade.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Solos do Cerrado brasileiro	2
2.2. Calagem	3
2.2.1. Princípios e recomendação atual	3
2.2.2. Corretivos para acidez do solo	4
2.3. Rochas sedimentares	4
2.3.1. Químicas (calcárias)	5
2.3.2. Detriticas (folhelho)	6
2.4. Cultura da Soja	7
3 MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Caracterização do solo e calcários	8
3.2. Tratamentos	9
3.3. Avaliações	11
3.4. Análises estatísticas	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4.1. Calcários e misturas	13
4.2. Tempo	14
4.3. Dose	15
4.4. Interação calcários e misturas x tempo	16
4.5. Interação dose x tempo	18
4.6. Interação calcários e misturas x tempo x dose	19
4.7. Variáveis fisiológicas – calcários e misturas	21
4.8. Variáveis fisiológicas - tempo	22
4.9. Variáveis fisiológicas – calcários e misturas x tempo	23
4.10. Análise canônica	24
5 CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Caracterização do solo coletado em profundidades de 0-20 cm, utilizado no experimento conduzido em Rio Verde (GO), 2024.....	8
TABELA 2	Caracterização química dos calcários, realizadas em laboratório, conforme amostras coletadas em Indiara (GO), 2023.....	9
TABELA 3	Doses aplicadas em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função de calcários e misturas com diferentes PRNT, utilizadas no experimento conduzido em Rio Verde (GO), 2024.....	10

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Diâmetro de caule (A), número de nódulos (B) e teor de Fe (C), em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função de calcários e misturas com diferentes PRNT. (D, DCC, DCE, M1 e M2).....	14
FIGURA 2	Diâmetro de caule (A), área foliar (B), MSR (C), MSPA (D), número de nódulos (E) e teor de Fe (F), medidos em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função de diferentes tipos de incubação (0, 10 e 45 dias).....	15
FIGURA 3	Teor de S (A), Fe (B), Zn (C), Co (D), nas plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação, em função das doses de calcário (ajustada e uniforme). Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.....	16
FIGURA 4	MSN (A), índice de clorofila <i>a</i> (B), índice de clorofila <i>b</i> (C), teor dos seguintes macronutrientes: Ca (D), S (E), Cu (F), Mn (G), Zn (H) e Co (I) nas plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação, em função da interação entre os diferentes tipos de calcário e misturas (D, DCC, DCE, M1 e M2) e tempos de incubação distintos (0, 10 e 45 dias).....	18
FIGURA 5	Teor de P na parte aérea das plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função da dose técnica e da dose uniforme em diferentes tempos de incubação (0, 10 e 45 dias). Médias seguidas por mesma letra minúsculas não diferem entre si na mesma condição de dose e médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem entre si numa mesma condição de Tempo. As barras verticais representam o erro padrão da média.....	19
FIGURA 6	Teor de K (A), Mg (B), B (C) e Ni (D) na parte aérea das plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tipo de calcário e das misturas (D, DCC, DCE, M1 e M2), de acordo com o tempo de incubação (0, 10 e 45 dias) e as doses de calcário calculadas (ajustada e uniforme)..	20

FIGURA 7	Índice de clorofila total (A) e relação clorofila <i>a/b</i> (B) nas plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tipo de calcário e das misturas (D, DCC, DCE, M1 e M2).....	21
FIGURA 8	Centros de reação (A), desempenho fotossintético (B), dissipação de energia (C) e fluorescência inicial (D) das plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tempo de incubação (0, 10 e 45 dias).....	23
FIGURA 9	Medição de elétrons em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tempo de incubação (0, 10 e 45 dias) associado a calcários e misturas com diferentes PRNT (D, DCC, DCE, M1 e M2).....	24
FIGURA 10	Análise discriminante canônica com variáveis obtidas em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tempo de incubação (0, 10 e 45 dias) associado a calcários e misturas com diferentes PRNT (D, DCC, DCE, M1 e M2).....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al – Alumínio

B – Boro

Ca – Cálcio

CaCl₂ – Cloreto de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

Co – Cobalto

Cu – Cobre

D – Calcário dolomítico – PRNT 102,5%

DCC – Calcário dolomítico cinza claro – PRNT 72,9%

DCE – Calcário dolomítico cinza escuro – PRNT 67,8%

ER – Reatividade das partículas

ETR – Taxa de transporte de elétrons

Fe – Ferro

F₀ – Fluorescência mínima ou inicial

F_m – Fluorescência máxima

F_v – Fluorescência variável

F_v/ F_m – Eficiência quântica potencial do fotossistema II

K – Potássio

H + Al – Acidez potencial do solo

HCl – Ácido clorídrico

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de magnésio

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

MSN – Massa seca de nódulos

MSPA – Massa seca de parte aérea

MSR – Massa seca de raiz

M1 – Mistura 1: 70% de calcário dolomítico cinza claro e 30% de folhelho – PRNT 66,8%

M2 – Mistura 2: 71,5% de calcário dolomítico cinza escuro e 28,5% de folhelho – PRNT 61,1%

N – Nitrogênio

Ni – Níquel

P – Fósforo

pH – Potencial hidrogeniônico

PN – Poder de neutralização

PRNT – Poder relativo de neutralização total

S – Enxofre

SiO₂ – Dióxido de silício

Zn – Zinco

RESUMO

OLIVEIRA, D. C. Mestrado, UniRV - Universidade de Rio Verde, dezembro de 2025. 50 p.
Uso potencial de rochas calcárias com diferentes composições químicas, incluindo folhelho, como fontes de nutrientes no desenvolvimento inicial da soja. Orientador: Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin. Coorientador: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias.

A composição química dos calcários varia muito além dos teores de Ca e Mg. As respostas das plantas em sistemas produtivos, pode variar quando se adiciona micronutrientes no processo de calagem, pois alguns calcários apresentam maiores quantidades desses elementos devido a origem e formação do material. O objetivo foi avaliar a correção da acidez, eficiência agrônômica e o potencial fornecimento de micronutrientes para plantas de soja com a aplicação de diferentes corretivos de acidez e uso de fontes alternativas como o folhelho. O experimento foi conduzido, com a cultura da soja em casa de vegetação, com vasos preenchidos com solo, foi instalado no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5x3x2, sendo cinco fontes de calcário e misturas com folhelho (D - PRNT>90%; DCC - PRNT 72,9%; DCE - PRNT 67,8%; M1 - PRNT 66,8% e M2 - PRNT 61,1%), três épocas de aplicação (45 dias antes do semeio; 10 dias antes do semeio e no dia do semeio), duas doses (dose técnica e dose uniforme). O experimento foi instalado com quatro repetições, totalizando 120 parcelas experimentais. Ao final do experimento imediatamente antes de colheita, foi determinado os índices de clorofila *a* e *b*, clorofila total, relação clorofila *a/b*, fluorescência inicial, estresse, fotossistema máximo, dissipação de energia, desempenho fotoquímico, centros de reação, medição de elétrons e avaliados o diâmetro de caule, altura de plantas, número de folhas, índice de área foliar (comprimento e largura das folhas) e contagem de nódulos. Após a colheita, secagem e determinação da massa seca das partes das plantas (raiz, parte aérea e nódulos), foram determinados os teores de macro e micronutrientes nas plantas de soja. Coletou-se amostras de solo em todas as parcelas, para caracterização dos parâmetros referentes à fertilidade do solo. As misturas contendo folhelho apresentaram desempenho equivalente aos calcários sem mistura, não apresentando efeitos negativos às variáveis morfológicas, fisiológicas e nutricionais da soja, incluindo diâmetro de caule, número e massa de nódulos, massa seca da parte aérea e raízes, além das concentrações individuais de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B e Mo. Os parâmetros de fluorescência (F_0 , F_m , F_v/F_m) e de dissipação de energia também se mantiveram estáveis, indicando ausência de estresse fotossintético associado ao uso do folhelho. Assim, os resultados demonstram que o folhelho pode ser utilizado com segurança como componente de misturas corretivas, configurando-se como uma alternativa viável e sustentável. Sua aplicação de forma associada aos calcários convencionais mostra-se especialmente relevante, uma vez que esse material é atualmente considerado um passivo ambiental oriundo do processo de extração do calcário.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Calcário dolomítico. Calagem. Fontes alternativas. Análises fisiológicas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, D. C. Master's degree, UniRV – University of Rio Verde, December, 2025. 50 p.
Potential use of limestone rocks with different chemical compositions, including shale, as nutrient sources in the early development of soybeans. Advisor: Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin. Coadvisor: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias.

The chemical composition of limestones varies far beyond just Ca and Mg content. Plant responses in production systems can vary when micronutrients are added during the liming process, as some limestones have higher amounts of these elements due to their origin and formation. The objective was to evaluate the correction of acidity, agronomic efficiency, and potential supply of micronutrients to soybean plants with the application of different acidity correctives and the use of alternative sources such as shale. The experiment was conducted with soybean cultivation in a greenhouse using pots filled with soil. It was set up in a completely randomized design in a 5x3x2 factorial scheme, with five limestone sources and mixtures with shale (D - PRNT>90%; DCC - PRNT 72.9%; DCE - PRNT 67.8%; M1 - PRNT 66.8% and M2 - PRNT 61.1%), three application times (45 days before sowing; 10 days before sowing and on the day of sowing), and two doses (technical dose and uniform dose). The experiment was set up with four replications, totaling 120 experimental plots. At the end of the experiment, immediately before harvest, the following were determined: chlorophyll a and b indices, total chlorophyll, chlorophyll a/b ratio, initial fluorescence, stress, maximum photosystem, energy dissipation, photochemical performance, reaction centers, electron measurement, and the following were evaluated: stem diameter, plant height, number of leaves, leaf area index (leaf length and width), and nodule count. After harvest, drying, and determination of the dry mass of plant parts (root, shoot, and nodules), the macro and micronutrient contents in the soybean plants were determined. Soil samples were collected from all plots to characterize parameters related to soil fertility. The mixtures containing shale showed performance equivalent to unmixed limestones, with no negative effects on the morphological, physiological, and nutritional variables of soybeans, including stem diameter, number and mass of nodules, shoot and root dry mass, as well as the individual concentrations of N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, and Mo. Fluorescence parameters (F0, Fm, Fv/Fm) and energy dissipation also remained stable, indicating an absence of photosynthetic stress associated with the use of shale. Thus, the results demonstrate that shale can be safely used as a component of corrective mixtures, representing a viable and sustainable alternative to conventional limestone, given that the latter is currently considered an environmental liability resulting from limestone extraction.

Keywords: *Glycine max* L. Dolomitic limestone. Liming. Alternative sources. Physiological analyses.

1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que os solos brasileiros apresentam naturalmente baixa fertilidade, elevada acidez e alto teor de saturação por Al devido ao processo de intemperização, característico da formação da maioria desses solos (Fageria et al., 2013). Para possibilitar o cultivo, é necessário manejar esses solos, diminuindo a acidez e o teor de Al tóxico. Dessa forma, a aplicação de corretivos é fundamental para assegurar o uso agrícola desses ambientes, sendo necessário a realização da análise de solo, definição do tipo e dose do corretivo (Joris et al., 2013).

O calcário, um dos corretivos existentes, caracteriza-se por ser uma rocha de natureza sedimentar, constituída por carbonatos de Ca e Mg, sendo seu tipo: calcítico, dolomítico ou magnesiano a depender dos teores de Mg. O calcário é um importante corretivo de acidez do solo e uma das principais fontes de Ca e Mg para os solos agrícolas (Fageria; Stone, 2004). Ressalta-se que além da escolha do tipo de calcário a ser utilizado como corretivo, os critérios técnicos para sua aplicação envolvem a forma que esta será realizada e profundidade de incorporação. Em áreas de abertura ou renovação, a aplicação ocorrerá de forma incorporada com aração e gradagem considerando a profundidade de 0-20 cm (Joris et al., 2016), já em áreas estabelecidas de plantio direto a aplicação ocorrerá de forma superficial sem revolvimento, e nesse caso a dose deverá ser relativizada entre 1/3 e 1/2 da recomendação, para evitar o efeito da super calagem na superfície do solo (Nolla, 2003; Caires et al., 1999).

A granulometria do calcário é fundamental para assegurar a eficiência da calagem, uma vez que somente ocorrerá o efeito de neutralização de Al tóxico e correção da acidez quando as partículas forem menores que 2,0 mm (Natale; Coutinho, 1994). Os autores ainda mostraram que partículas menores que 0,3 mm reagiram de forma rápida, porém a maior eficiência a médio e longo prazo, após 30 meses, foi representado pelas partículas de calcário entre 0,3 e 0,6 mm.

A aplicação de doses de calcário calcítico e dolomítico finamente moído nas doses 0, 3, 6 e 9 t ha⁻¹, mostraram-se eficientes para elevar a saturação por bases, teores de Ca e Mg e crescimento de plantas de soja e milho. A dose calculada para elevar a saturação para aproximadamente 70% foi a de 6 t ha⁻¹, a dose de 9 t ha⁻¹, não conseguiu atingir a saturação desejada, porém mostrou efeitos iniciais negativos no crescimento dessas culturas (Lange et al., 2022).

A composição química dos calcários varia muito além dos teores de Ca e Mg, Dos Anjos (1991), estudou a composição química de um calcário misturado com folhelho e verificou que

este calcário apresentou maiores teores totais dos micronutrientes: Cu, Fe, Mn e Zn, em comparação a um calcário comercial. Dessa forma, sabe-se que as respostas das plantas em sistemas produtivos, pode variar quando se adiciona micronutrientes no processo de calagem, pois alguns calcários apresentam maiores quantidades desses elementos devido a origem e formação do material.

A aplicação de doses do calcário de Irati, material oriundo de rejeito de mineração que também apresenta folhelho na constituição, possibilitou na dose 6 t ha⁻¹ incremento no teor foliar de Zn nas plantas avaliadas em comparação a um calcário comercial (Assmann et al., 1999).

No presente trabalho foi utilizado LATOSSOLO VERMELHO Distrófico que possui baixa fertilidade. Este tipo de solo é amplamente encontrado nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste do Brasil, sendo crucial para a produção nacional de grãos. Sua presença é predominante em áreas de relevo plano e suavemente ondulado, o que facilita a mecanização agrícola (Zonta et al., 2014).

O objetivo desse experimento foi avaliar a correção da acidez e o potencial fornecimento de nutrientes, no desenvolvimento inicial de soja, com aplicação de calcários com diferentes PRNT associados à folhelho como mistura alternativa em três épocas de aplicação e duas doses.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solos do cerrado brasileiro

O solo é composto por corpos naturais, constituídos por componentes sólidos, líquidos e gasosos, com estrutura tridimensional e dinâmica. Esses corpos são formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte da camada superficial das terras continentais do planeta. Além disso, contém matéria viva, que sustenta a vegetação que ocorrem naturalmente e, em alguns casos, podem ter sido alterados por ações humanas (Harrison; Strahm, 2008).

Os solos em sua maioria podem ser ácidos de acordo com a composição dos materiais que constituíram sua formação e das condições de intemperismo, como é o caso dos solos do Cerrado brasileiro, que se caracterizam por baixo teor de bases trocáveis (Ca, Mg e K). Além disso, a acidez do solo pode aumentar em regiões em que a quantidade de chuva é superior à capacidade do solo e das plantas de perderem água por evaporação e transpiração

respectivamente, resultando na perda dos nutrientes presentes no solo através do processo de lixiviação (Fageria; Gheyi, 1999). A acidez do solo limita a produção agrícola em muitas regiões do mundo, devido à toxicidade do Al e do Mn, além da baixa saturação de bases (JORIS et al., 2016).

A região do Cerrado possui como característica o clima tropical, em que os períodos de seca e chuva são bastante definidos. Desta forma, os solos do Cerrado são caracterizados por sua alta acidez, níveis tóxicos de alumínio e baixa fertilidade, que podem ser oriundos de longos períodos chuvosos, associados a temperaturas altas (Cassol et al., 2023; Goedert, 1983; Polesso et al., 2021).

A disponibilidade dos nutrientes no solo é afetada por uma diversidade de variáveis e condições, incluindo o valor do pH (Nolla; Anghinoni, 2004). Em solos com pH excessivamente ácido, a disponibilidade de nutrientes como: P, Ca, Mg, K e Mo é reduzida (Fageria et al., 2013). Nesta condição de pH, ocorre o aumento da solubilização de íons como: zinco, cobre, ferro, manganês e alumínio que, dependendo do manejo do solo e da adubação utilizados, podem atingir níveis tóxicos às plantas (Zan et al., 2013).

A eficiência dos fertilizantes é reduzida em solos ácidos, por isso a calagem deve ser a primeira medida adotada para corrigir a fertilidade do solo. Para garantir uma melhor disponibilidade de nutrientes e evitar a toxicidade de alguns elementos, é importante manter o pH (CaCl_2) do solo entre 5,4 e 5,9 (Dalchiavonl et al. 2012).

2.2 Calagem

2.2.1 Princípios e recomendação atual

O material de origem e os processos que formam os solos, têm relação direta, com a capacidade daquele solo de reter água, permitir entrada de ar e regular a temperatura, atuando diretamente na disponibilidade de micronutrientes para as plantas (Fageria, 2001). De acordo com Ayala e Rao (2002), a suplementação adequada e o uso em quantidades adequadas de macro e micronutrientes para fertilizar o solo podem variar de acordo com suas características, bem como das alterações e condições ambientais resultantes de se utilizar corretivos e fertilizantes buscando melhorar a qualidade do solo.

A calagem, quando realizada adequadamente, permite o uso racional do solo, pois reduz os efeitos prejudiciais da acidez, diminuindo a concentração de elementos como Fe, Al e Mn na solução do solo, que podem estar em níveis tóxicos para as culturas. A aplicação de calcário

no solo não só eleva o pH, mas também aumenta a disponibilidade de Ca, Mg, P, K e alguns micronutrientes para as plantas (Minato et al., 2023). Caracteriza-se por ser uma das alternativas agrícolas utilizadas para corrigir a acidez do solo, disponibilizando as plantas Ca e Mg (Fageria, 2001).

No Brasil, ao longo dos anos é possível identificar um aumento do pH do solo, decorrente da calagem como corretivo na busca pelo aumento da capacidade produtiva da soja (Teixeira et al., 2020). Em decorrência dessa alteração de pH é possível observar diminuição nos níveis de Al e Mn encontrados no solo, fazendo então com que a absorção de nutrientes, como: N, P, K e S ocorra de forma mais eficiente, o que acarreta maior fornecimento de Ca e Mg (Kunhikrishnan et al., 2016; Kalkhoran et al., 2019; Quaggio et al., 1993; Mascarenhas et al., 1976).

2.2.2 Corretivos para acidez do solo

A escolha do corretivo ideal e da dose adequada a ser aplicada no solo, relaciona-se com os resultados obtidos através das análises de solo realizadas dependendo dos valores identificados para pH, Al, Ca, Mg e H + Al na área de plantio, podendo desta maneira definir o corretivo a ser utilizado (Fageria et al, 2013).

A reação do calcário geralmente é restrita ao local em que é aplicado no solo. A calagem não reduz rapidamente a acidez do subsolo, pois este processo depende da lixiviação dos sais ao longo do perfil do solo, ou da profundidade de incorporação (Caires et al., 2004).

Para que o calcário tenha os efeitos desejados, é essencial que haja umidade no solo para sua reação. No entanto, a região dos Cerrados enfrenta uma estação seca de maio a setembro, período em que o solo geralmente tem pouca umidade. Portanto, a época mais indicada para a calagem é no final da estação chuvosa do último plantio, antes da semeadura em pelo menos 30 dias para óxidos e 90 dias para calcários em solos ácidos, ou, se isso não for viável, no início da estação chuvosa, pouco antes da semeadura (Cattelan; Agnol, 2018; Ketema; Tefera, 2022).

2.3 Rochas sedimentares

Uma rocha é uma combinação natural de minerais (geralmente dois ou mais) em proporções específicas, que ocorre em uma extensão significativa. As rochas são classificadas em três grandes grupos, de acordo com seu processo de formação: ígneas, metamórficas e

sedimentares. As rochas sedimentares representam apenas 5% da crosta terrestre, enquanto os 95% restantes são compostos por rochas ígneas ou metamórficas (Klein; Dutrow, 2012).

As rochas sedimentares são classificadas em três tipos principais: i) clásticas, que se formam pela fragmentação e subsequente deposição de rochas já existentes (como o arenito); ii) químicas, que surgem da precipitação química, como no caso dos carbonatos (por exemplo, calcário e dolomita) ou dos evaporitos (como gesso, anidrita e silvita); e iii) orgânicas, que se originam por precipitação biológica ou pela acumulação de matéria orgânica (como turfa, carvão e calcário) (Schön, 2015).

De acordo com Li e Ren (2011), as rochas sedimentares se formam na superfície da crosta terrestre sob condições de temperatura e pressão relativamente baixas, presentes em grande parte das superfícies terrestres e se caracterizam pela facilidade de mineração. Elas resultam da desagregação de rochas pré-existentes, seguida pelo transporte e deposição dos fragmentos ou, em casos menos frequentes, pela acumulação de substâncias químicas, possuem estruturas densas e são consideradas mais porosas, aumentando a absorção de água e resultando em menor resistência. Dependendo da composição do material, essas rochas podem ser classificadas como detríticas ou não detríticas (Klein; Dutrow, 2012).

2.3.1 Químicas (calcárias)

Rochas sedimentares não detríticas se formam pela precipitação química de sais ou pela acumulação de restos orgânicos. Quando resultam de sais, são denominadas rochas sedimentares químicas. Estas rochas são predominantemente compostas por: carbonatos, sulfatos, sílica, fosfatos e halogenetos. As principais rochas calcárias incluem o calcário, constituído essencialmente de calcita, e o dolomito, formado por dolomita (Greensmith, 1989).

As rochas calcárias possuem alta composição fóssil devido ao seu período de formação ao longo dos anos, tornando-as assim, uma rica fonte de compostos que ao serem trabalhados podem ser inseridos no solo para repor os nutrientes necessários para o cultivo agrícola. Desta maneira, as rochas constituem um dos principais ingredientes utilizados na indústria de fertilizantes, agregando valor à sua comercialização para uso na agricultura buscando realizar correções no solo (Britannica, 2024).

2.3.2 Detríticas (folhelho)

De acordo com Potter et al. (2005), as rochas sedimentares detríticas constituem um importante grupo de formações geológicas resultantes da deposição e compactação de fragmentos minerais e litológicos transportados por agentes naturais como água, vento e gelo, e representam aproximadamente dois terços do volume de rochas sedimentares do registro geológico.

Dentro do grupo de rochas detríticas, destacamos o folhelho, que são rochas compostas de grãos, com dimensões inferiores a 63 μm , finamente laminadas, muito porosas e pouco permeáveis (Schieber; Zimmerle, 1998). Os folhelhos são rochas de granulação muito finas, formadas pela compactação de partículas de argila e silte em ambientes deposicionais de baixa energia. Quando associados às jazidas de calcário, esses folhelhos ocorrem como camadas intercaladas ou encaixantes dentro das formações carbonáticas, refletindo variações paleoambientais durante a sedimentação (Potter et al., 2005).

A composição dos folhelhos presentes em depósitos calcários é dominada por argilominerais (ilita, caulinita, esmectita), quartzo e feldspatos, podendo conter carbonatos em proporções variáveis. Essa diversidade mineralógica confere aos folhelhos propriedades físicas e químicas distintas, influenciando sua porosidade, permeabilidade e potencial econômico (Passey et al., 2010). Diferentemente dos folhelhos betuminosos explorados para hidrocarbonetos, os folhelhos de origem calcária não têm relevância energética, mas sim, importância como material acompanhante na extração de calcário. Em muitos casos, sua presença influencia a qualidade do calcário destinado à produção de corretivos agrícolas ou clínquer para cimento, pois altera o teor de impurezas e a composição química final (Souza et al., 2017).

A extração desses folhelhos ocorre de forma conjunta com o calcário em pedreiras e minas a céu aberto. Durante o processo de beneficiamento, o folhelho pode ser separado ou aproveitado como insumo alternativo. Na indústria cimenteira, por exemplo, o folhelho é utilizado como fonte de sílica, alumina e ferro, complementando a composição necessária para a produção do clínquer. Esse aproveitamento contribui para reduzir desperdícios e otimizar o uso dos recursos minerais (Cunha et al., 2019).

2.4 Cultura da soja

O cultivo da leguminosa, originária da China, começou no sul do Brasil e, a partir da década de 1980, expandiu-se para o Cerrado devido ao desenvolvimento de variedades adaptadas a esse bioma. É importante destacar que outras áreas de pesquisa também fizeram avanços significativos, proporcionando novas tecnologias ao setor (Maranhão et al., 2019). Avanços científicos em manejo de solos, como técnicas de correção da acidez, inoculação de sementes para fixação biológica de N e adubação equilibrada com macro e micronutrientes, permitiram que a cultura expressasse seu potencial em diversas condições edafoclimáticas do Brasil (Freitas, 2011).

A soja se destaca como o grão mais relevante no cenário atual do agronegócio brasileiro. Tradicionalmente plantada durante o verão por conta de suas características fisiológicas e necessidades climáticas, a soja tem expandido sua área de cultivo a cada ano, consolidando-se como a principal cultura agrícola do Brasil (Costa et al., 2020). De acordo com Cattelan e Agnol (2018), no Brasil, a importância da soja pode ser medida tanto pelo notável crescimento da sua produção quanto pela receita gerada com a exportação de grãos e seus derivados (Branco et al., 2021).

A soja é uma fonte inesgotável de proteínas, fundamental na alimentação humana e de muitos animais que produzem carne, leite e ovos, oferecendo uma vasta gama de produtos (Ortega et al., 2005). Trata-se de uma cadeia produtiva ampla, já que os animais alimentados com rações à base de farelo de soja fornecem subprodutos que beneficiam outras áreas da economia, como os setores de couro, fertilizantes orgânicos e outros.

A soja tem se destacado por sua versatilidade e alto retorno financeiro, podendo ser exportada tanto em grãos quanto processada (Cattelan; Agnol, 2018). O processamento da soja e sua comercialização para uso como matéria-prima em indústrias de alimentação animal, biocombustíveis e produção de óleo têm crescido significativamente, tornando a exportação desses produtos cada vez mais frequente (Branco et al., 2021).

Além de sua importância econômica, a cadeia produtiva da soja exerce um papel social fundamental no Brasil, gerando milhares de empregos diretos e indiretos relacionados ao cultivo da soja. Esses empregos fortalecem a economia local e regional, promovendo o crescimento e o desenvolvimento do país (Maranhão et al., 2019; Toloi et al., 2021).

Nas últimas décadas, a produção de soja no Brasil registrou um avanço significativo (Maranhão et al., 2019). Esse crescimento foi impulsionado não apenas pela expansão da área

cultivada, mas também pela adoção de técnicas de manejo avançadas que aumentaram a produtividade (Freitas, 2011).

Dessa maneira, buscando contribuir cientificamente para o desenvolvimento do cultivo da soja no Brasil, e tendo em vista o uso da calagem como uma das principais soluções para corrigir as deficiências do solo e melhorar a qualidade da soja produzida, o presente trabalho foi desenvolvido para avaliar o impacto que a correção da acidez com a aplicação de diferentes corretivos incluindo fontes alternativas como o folhelho podem agregar ao desempenho da soja, buscando melhorar sua produtividade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do solo e calcários

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos preenchidos com 1,7 dm³ de solo classificado como um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, que possui baixa fertilidade. O solo foi coletado em área de Cerrado nativo, para assegurar que nunca tenha sido manejado para fins agrícolas.

Antes da instalação dos experimentos foi realizada análise química e física do solo coletado (Tabela 1), seguindo a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017a), para caracterização e definição da quantidade de calcário e misturas a ser aplicado ao solo para correção, para elevar a saturação por bases para 70%, condição usualmente utilizada para a cultura da soja.

TABELA 1 - Caracterização do solo coletado em profundidades de 0-20 cm, utilizado no experimento conduzido em Rio Verde (GO), 2024

Profundidade		pH		Al	H+Al	Ca	Mg	CTC	V	MOS
cm		CaCl ₂		-----		cmol _c dm ⁻³	-----		%	%
0 – 20		4,30		0,14	6,30	0,93	0,57	8,00	21,20	27,80
	Areia	Silte	Argila	P	S	K	Cu	Fe	Mn	Zn
				(Meh)						
		----- % -----		----- mg dm ⁻³ -----						
0 – 20	520,00	50,00	430,00	1,60	6,10	78,00	2,00	62,00	52,10	0,60

Meh = Mehlich⁻¹; MOS = matéria orgânica do solo.

As amostras dos calcários e misturas utilizados neste experimento foram analisadas para quantificação de CaO, MgO, PN, ER, teores de macro e micronutrientes, bem como presença de metais pesados de acordo com a metodologia Teixeira et al. (2017b). De posse desses resultados (Tabela 2) foi calculado o PRNT. Identificou-se nas análises realizadas altos valores de Fe na composição dos calcários e misturas, interferindo positivamente nos resultados das avaliações e análises realizadas posteriormente nas plantas de soja.

TABELA 2 – Caracterização química dos calcários, realizadas em laboratório, conforme amostras coletadas em Indiara (GO), 2023

ELEMENTOS	DCC PRNT 72,9%	DCE PRNT 67,8 %	D PRNT<90%	M1 PRNT 66,8%	M2 PRNT 61,1%
	----- (%) -----				
Cálcio	17,958588	20,058754	22,369880	13,880254	15,900021
Magnésio	9,000036	8,631248	11,625874	9,152021	8,151404
CaO (HCl 0,5 Mol)	25,200000	27,600000	28,400000	19,700000	21,500000
MgO (HCl 0,5 Mol)	14,600000	10,300000	20,200000	15,600000	11,400000
Zinco	0,000603	0,000602	0,000237	0,000865	0,000023
Cobre	0,000023	0,000060	0,000052	0,005597	0,000325
Ferro	0,423699	0,402400	0,223658	0,923658	0,448796
Cobalto	0,000021	0,000034	0,000016	0,000325	0,000100
Boro	0,006215	0,018325	0,000563	0,000603	0,000396
Molibdênio	0,116203	0,133945	0,070640	0,004902	0,004564
Potássio	0,038021	0,058140	0,023988	0,057411	0,044583
Manganês	0,119963	0,160255	0,007037	0,145021	0,150325
Fósforo	0,073955	0,066690	0,039548	0,033258	0,043255
Enxofre	0,099963	0,095214	0,069877	0,053694	0,110365
SiO ₂	17,100000	21,700000	4,600000	25,800000	26,500000
Selênio	0,002625	0,000254	0,000033	0,002300	0,000236
Lítio	0,005625	0,008326	0,000276	0,009855	0,010000
Alumínio	0,275863	0,596255	0,108852	0,556321	0,609585
Cadmio	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Chumbo	0,060215	0,033370	0,096301	0,060215	0,045876
Arsênio	0,002366	0,001952	0,000102	0,003215	0,003022
Níquel	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Silício	8,593805	9,014079	3,000000	9,063566	8,180633

LD: Limite de detecção do equipamento de quantificação.

3.2 Tratamentos

O experimento foi instalado no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5x3x2, sendo cinco calcários e misturas, três épocas de aplicação (45 dias antes do

semeio; 10 dias antes do semeio e no dia do semeio – zero dias) e duas doses (Tabela 3). O experimento foi instalado com quatro repetições, totalizando cento e vinte parcelas experimentais.

Foram utilizados calcários puros coletados em Indiara (GO). O primeiro, denominado D, que consiste em um calcário dolomítico com PRNT >90%, especificamente 105,2%; o segundo DCC, que consiste um calcário dolomítico cinza claro que possui PRNT de 72,9%; o terceiro DCE, que consiste em um calcário dolomítico cinza escuro que possui PRNT de 67,8%; para condições de avaliação do trabalho, foram elaboradas duas misturas contendo calcários puros de menores PRNT associados ao folhelho. A primeira mistura, designada como M1, composta por 70% do calcário dolomítico cinza claro e 30% de folhelho, apresentando PRNT de 66,8%, e a segunda mistura, designada de M2, composta por 71,5% do calcário dolomítico cinza escuro e 28,5% de folhelho, apresentado PRNT de 61,1%.

Para as doses foram testados dois cenários, sendo o primeiro deles designado como dose técnica, que consiste naquela calculada a partir da recomendação realizada, através da relativização padrão do PRNT; e o segundo cenário, designado de dose uniforme, em que foi realizado o cálculo considerando o valor indicado, para o calcário que possuía maior PRNT (acima de 90% - dolomítico), resultando nesse caso, na aplicação da mesma quantidade de todos os calcários, o que significa que, para os calcários e misturas de menor PRNT, a quantidade aplicada foi menor do que a indicada quando considerada a relativizada pelo PRNT (Tabela 3).

TABELA 3 – Doses aplicadas em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função de calcários e misturas com diferentes PRNT, utilizadas no experimento conduzido em Rio Verde (GO), 2024

Calcário	Dose técnica (relativizada pelo PRNT)	Dose Uniforme
		Mesma dose para todos – calculada pelo PRNT>90%
	----- (t ha ⁻¹) -----	-----
D - PRNT>90%	3,0283 (2,574 g/vaso*)	3,0283 (2,574 g/vaso*)
DCE - PRNT 67,8%	4,5782 (3,891 g/vaso*)	3,0283 (2,574 g/vaso*)
DCC - PRNT 72,9%	4,2579 (3,619 g/vaso*)	3,0283 (2,574 g/vaso*)
M1 - PRNT 66,8%	4,6467 (3,949 g/vaso*)	3,0283 (2,574 g/vaso*)
M2 - PRNT 61,1%	5,0802 (4,318 g/vaso*)	3,0283 (2,574 g/vaso*)

* vasos contendo 1,7 dm³ de solo.

Os vasos foram preparados nas três épocas de aplicação, com aplicação dos calcários e misturas homogeneizadas nas respectivas doses. Aos 45 dias antes do semeio foram montados os primeiros grupos de vasos, 10 dias antes do semeio o segundo grupo de vasos e no dia do semeio os últimos vasos. Todos os vasos foram mantidos irrigados em 60 % da capacidade de campo para assegurar que ocorresse a reação dos calcários.

Para realização do experimento foi semeada a cultivar de soja CZ 37b43. Foram semeadas 6 sementes de soja, por vaso, e 10 dias após a germinação, as plantas foram desbastadas, deixando as 2 plantas mais vigorosas, as quais foram conduzidas até o florescimento, pelo prazo de 50 dias.

Durante a condução do experimento, os vasos foram irrigados diariamente, para repor a quantidade de água perdida, por meio da evapotranspiração de cada vaso, por meio da pesagem do conjunto vaso+solo+planta, foi reposta a água perdida, considerando 60% da capacidade de campo determinada do solo.

Todas as parcelas receberam adubação via solução no solo com macronutrientes com exceção ao Ca e Mg, segundo recomendações de Malavolta (1980) para ensaios em vasos, foram aplicados as seguintes adubações: 57,7 mg dm⁻³ de N, 125 mg dm⁻³ de P, 30 mg dm⁻³ de S e 150 mg dm⁻³ de K usando 277,73 mg vaso⁻¹ de K₂SO₄ (P.A), 456,003 mg vaso⁻¹ de KH₂PO₄ e 462,74 mg vaso⁻¹ de (NH₄)₂ HPO₄.

3.3 Avaliações

Ao final do experimento, imediatamente antes da colheita, foram determinados os índices de: clorofila *a* e *b*, clorofila total, relação clorofila *a/b*, fluorescência inicial, estresse, fotossistema máximo, dissipação de energia, desempenho fotoquímico, centros de reação, medição de elétrons, na terceira folha completamente estendida, utilizando o aparelho SPAD 502 da Minolta.

Avaliou-se: o diâmetro de caule, com auxílio de um paquímetro digital, a altura de plantas, que foi medida com uso de uma régua considerando a altura da base da planta rente ao solo até o ápice da planta, foi realizada a contagem do número de folhas, o índice de área foliar sendo calculado através da medição do comprimento e largura das folhas, com o auxílio de uma régua, bem como a contagem do número de nódulos presentes nas raízes.

Os teores de macro e micronutrientes foram analisados nas plantas de cada tratamento segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), após a colheita, sendo realizada a secagem e determinação da massa seca das partes das plantas, sendo avaliados: MSR, MSPA e MSN. Na

sequência realizou-se a determinação dos teores, calculando os elementos químico relativizado, pela massa seca obtida, em cada unidade experimental.

Ao final, foram coletadas amostras de solo, em todas as parcelas experimentais, para caracterização dos parâmetros referentes à fertilidade do solo.

3.4 Análises estatísticas

Os dados discrepantes foram corrigidos e na sequência ocorreu a análise de variância e quando significativos ($p < 0,05$) foi aplicado teste de média (Tukey, $p < 0,05$) para separar o efeito dos calcários e misturas avaliados, através do uso do software estatístico R (R CORE TEAM, 2025).

Para avaliar os efeitos principais e a interação entre os fatores calcários e misturas e tempo de incubação, ajustou-se um modelo de análise multivariada de variância (MANOVA) considerando, de forma conjunta, variáveis morfológicas (diâmetro do caule, altura da planta, número de folhas, comprimento e largura foliar, área foliar), produtivas (MSR, MSPA, número de nódulos) e nutricionais (teores de clorofila *a* e *b*, clorofila total, relação clorofila *a/b*, fluorescência inicial, estresse, fotossistema máximo, dissipação de energia, desempenho fotoquímico, centros de reação, medição de elétrons, além dos teores de: N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Co e Ni na parte aérea). O teste de Wilks' Lambda foi utilizado para avaliar a significância global dos efeitos dos fatores e de sua interação.

Em seguida, ajustou-se um modelo linear multivariado para as mesmas variáveis, sobre o qual foi aplicada a análise discriminante canônica (CDA) por meio do pacote candisc. Essa técnica permitiu identificar os eixos canônicos, que melhor discriminaram os tratamentos com diferentes fontes de calcário e tempos de incubação, bem como as variáveis com maior peso na separação dos grupos. A representação gráfica da estrutura canônica foi utilizada para visualizar a proximidade e distinção entre os tratamentos.

Todas as análises foram realizadas em nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da alternância ocorreu para as variáveis avaliadas, como: altura de plantas, número de folhas, comprimento de folhas e largura de folhas, não verificou-se diferença significativa.

4.1 Calcários e misturas

Ao se avaliar o fator calcário e misturas, observou-se diferenças significativas em relação: ao diâmetro de caule das plantas, a contagem do número de nódulos e no teor de Fe na parte aérea (Figura 1).

A variável diâmetro de caule apresentou diferença significativa para os tipos de calcários e misturas utilizados, sendo que o maior diâmetro foi observado com o uso dos calcários D (PRNT>90%), M1 (PRNT 66,8%) e DCC (PRNT 72,9%) diferindo estatisticamente do tratamento M2 (PRNT 61,1%). O calcário DCE (PRNT 67,8%) apresentou valor intermediário e não diferiu significativamente do tratamento D (PRNT>90%) (Figura 1A). O calcário D (PRNT>90%) apresentou maior eficiência em elevar o pH e neutralizar o Al mais rapidamente. Essa ação resultou em um sistema radicular mais robusto, que se reflete em maior diâmetro de caule em comparação com calcários de baixo PRNT (Ratke et al., 2021).

M1 (PRNT 66,8%) promoveu maior número de nódulos, sendo estatisticamente superior aos demais tratamentos (Figura 1B). Os outros calcários e misturas apresentaram desempenho semelhante entre si, com médias variando entre 2,4 e 3,3 nódulos, sugerindo que a nodulação pode não estar diretamente associada apenas ao PRNT, mas também a outros fatores do corretivo, e considerando também o solo utilizado, caracterizado como ácido. De acordo com Sumner e Noble (2023), neste tipo de solo pode haver comprometimento no desenvolvimento da planta, devido a menor disponibilidade de alguns nutrientes.

O maior teor de Fe (Figura 1C) foi verificado com o tratamento M2 (PRNT 61,1%), diferindo significativamente apenas do M1 (PRNT 66,8%), o qual apresentou o menor valor.

Os demais tratamentos foram estatisticamente semelhantes, indicando que o PRNT não influenciou de forma clara o teor de Fe, favorecendo o uso de M2 (PRNT 61,1%), como fonte alternativa de Fe. Acredita-se que esse maior teor seja correspondente ao aporte de Fe contido no folheto e a reação lenta do pH, devido a diversos resultados encontrados na literatura, em que a aplicação de calcário não interfere no teor de Fe nas plantas de soja (Moreira et al., 2017).

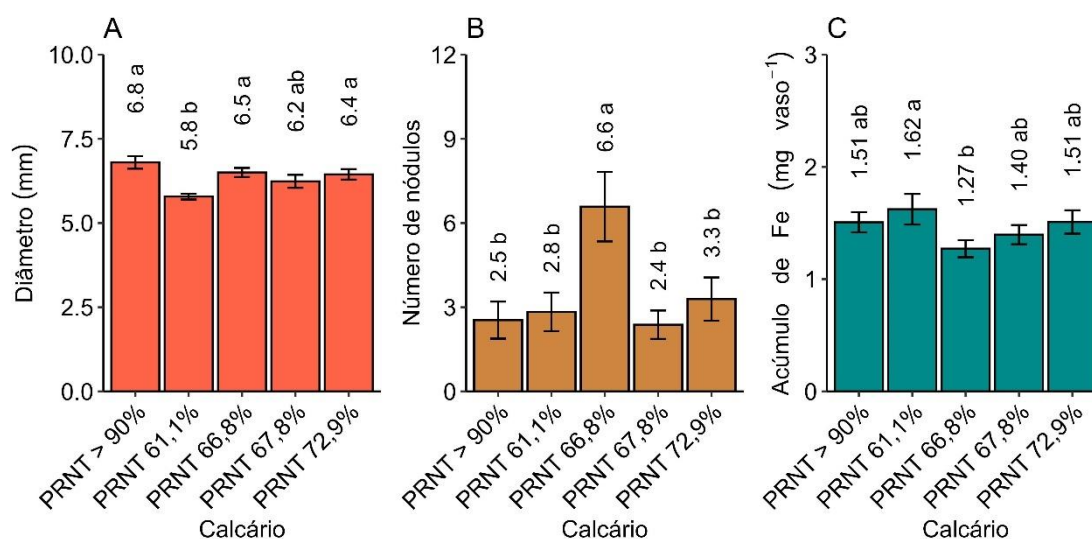


FIGURA 1 - Diâmetro de caule (A), número de nódulos (B) e teor de Fe (C), em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função de calcários e misturas com diferentes PRNT. (D, DCC, DCE, M1 e M2). Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.2 Tempo

Em relação ao fator tempo de incubação, destacaram-se os resultados das variáveis: diâmetro de caule, área foliar, MSR, MSPA, número de nódulos e teor de Fe, conforme Figura 2.

Foi observado o melhor resultado de diâmetro de caule para o tempo de 45 dias, o que indica benefício da antecipação na aplicação do corretivo sobre o vigor das plantas (Figura 2A), corroborando com Andriolo (1999), que associa o aumento do diâmetro do caule com o maior teor de assimilados e melhor desenvolvimento.

A área foliar (Figura 2B) foi significativamente menor apenas no tempo de incubação de 45 dias. Incubações de 10 dias e a não incubação proporcionaram maiores áreas foliares. A MSPA foi superior no tempo zero, com redução gradual até 45 dias, embora as diferenças observadas sejam pequenas (Figura 2D). Resultados estes, divergentes dos observados por Nogueira et al. (2010) e Martins e Pitelli (2000), em que a MSPA tendem a ser maior em maiores tempos de incubação.

Para MSR, a maior MSR (Figura 2C) foi obtida com incubação de 10 dias (Figura 2C), diferindo estatisticamente dos demais tempos. A aplicação de calcário afetou significativamente o crescimento radicular e proporcionou aumento desse volume (Moraes et al., 2023; Bossolani et al., 2021).

O maior número de nódulos (Figura 2E) ocorreu sem incubação, sendo drasticamente reduzido após 10 e 45 dias, mesmo não sendo realizada a inoculação das sementes.

O teor de Fe aumentou com o tempo de incubação, sendo maior aos 10 e 45 dias, expressando melhor disponibilidade e absorção do micronutriente com o tempo de incubação (Figura 2F), divergindo dos resultados encontrados por Moreira et al. (2017), em que a calagem tende a não afetar o teor de Fe nas folhas das plantas de soja. Esses resultados podem ser parcialmente explicados pelo teor de Fe disponibilizado nos corretivos avaliados (Tabela 1).

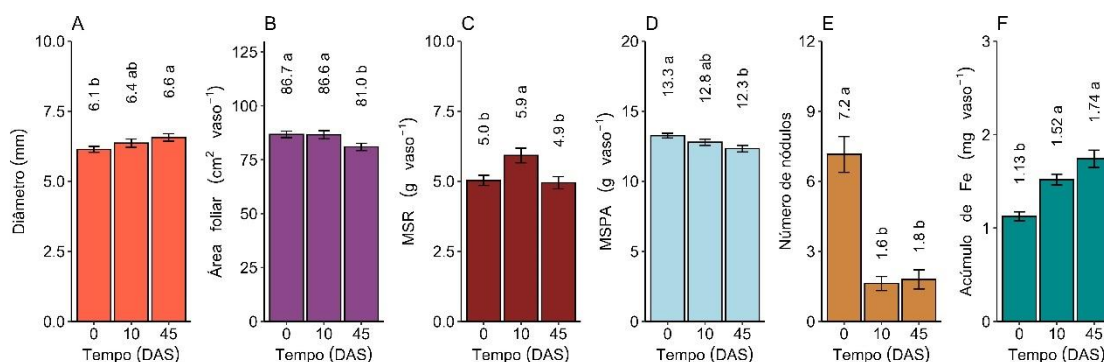


FIGURA 2 - Diâmetro de caule (A), área foliar (B), MSR (C), MSPA (D), número de nódulos (E) e teor de Fe (F), medidos em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função de diferentes tipos de incubação (0, 10 e 45 dias). Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.3 Dose

Ao se avaliar o fator dose, observou-se que houve teores significativos dos nutrientes S, Fe, Zn e Co, conforme Figura 3.

Pode-se verificar que, a dose técnica, calculada de acordo com o PRTN de cada calcário, apresentou resultados melhores quando considerados o S e o Fe. A aplicação do calcário aumentou o pH do solo, reduzindo a quantidade de Fe disponível, porém devido ao Fe presente no calcário aplicado, fez com que aumentasse a disponibilidade deste elemento. No caso da dose uniforme, em que se utilizou a base de cálculo do calcário com maior PRNT (>90%) e se aplicou para os demais, resultando na aplicação de uma mesma quantidade de todos os calcários, fez com que fosse aplicada uma quantidade menor dos calcários de menor PRNT, quando comparado à dose técnica, ocorrendo um menor fornecimento de Fe, resultado em valores menores para esse nutriente e aumentando a solubilização do calcário e apresentando

maior teor de Zn e Co, corroborando com o observado anteriormente, sendo que: o aporte do S e Fe veio do calcário aplicado.

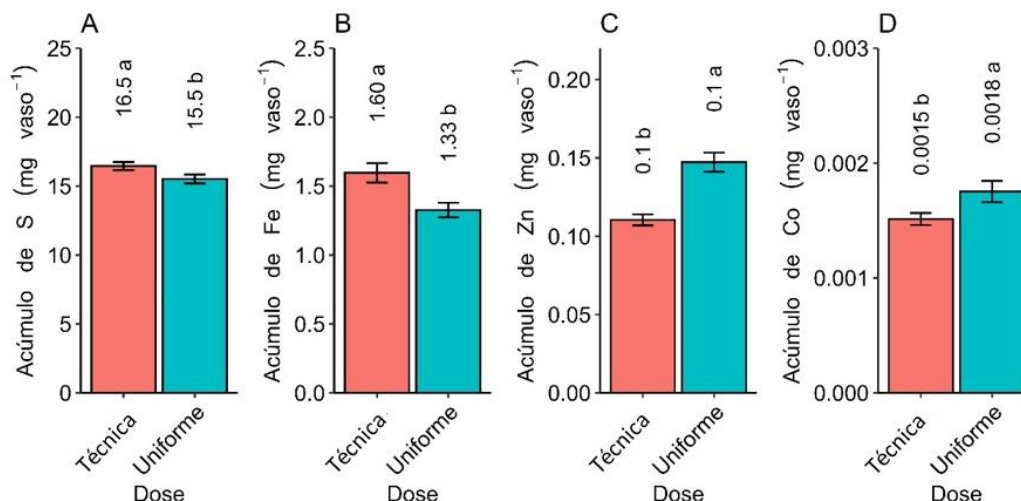


FIGURA 3 - Teor de S (A), Fe (B), Zn (C), Co (D), nas plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação, em função das doses de calcário (ajustada e uniforme). Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.4 Interação calcários e misturas x tempo

A interação entre os diferentes calcários incluindo as misturas, e os diferentes tempos de incubação apresentaram resultados significativos para contagem da MSN, índice de clorofila *a* e *b*, e no teor dos seguintes nutrientes: Ca, S, Cu, Mn, Zn e Co, conforme Figura 4.

A maior MSN ocorreu com M1 (PRNT 66,8%) em todas as condições de incubação (Figura 4A), proporcionado pela composição da mistura de folhelho, enquanto os menores valores foram observados com M2 (PRNT 61,1%) após 45 dias. Quanto maior o tempo de incubação, mais pronunciada foi a diferença entre os calcários. Observou-se os melhores resultados no tempo de incubação zero, em que também se obteve maior contagem de nódulos e maior teor de Co, nutriente essencial na nodulação (Hu et al., 2021; Abreu-Junior et al., 2023).

Em relação aos índices de clorofila *a* e *b* (Figuras 4B e 4C), as diferenças foram pouco pronunciadas entre os tratamentos, indicando que o teor de clorofilas nas folhas não foi sensível à interação entre PRNT e tempo de incubação, semelhante ao visto por Santos, et al. (2020). Entretanto, no tempo zero de incubação, os valores obtidos por M1 (PRNT 68,8%) foram menores tanto em comparação aos demais corretivos avaliados quanto às épocas.

O maior teor de Ca foi obtido com DCE (PRNT 67,8%) após 45 dias de incubação, enquanto valores significativamente menores ocorreram com M1 (PRNT 66,8%) com 10 dias de incubação (Figura 4D). Isso evidencia que a antecipação da calagem melhora a absorção de Ca, especialmente com calcários de reatividade intermediária (Ratke et al., 2021).

Na avaliação de teor de S (Figura 4E) na parte aérea das plantas houve uma redução progressiva de acordo com o tempo de incubação. Os maiores valores foram observados no tempo zero, independentemente do PRNT. Em suma, a máxima absorção de S inicial reflete a disponibilidade pontual do corretivo, enquanto a redução posterior reflete o sucesso da calagem em promover o crescimento da soja, diluindo o teor de S no tecido vegetal. A absorção de S é similar à do N, especialmente por exigir sua redução antes da incorporação aos aminoácidos que compõem proteínas, coenzimas e diversos outros metabólitos (Mascarenhas et al., 2013).

Observou-se redução acentuada no teor de Cu, com o aumento do tempo de incubação, comportamento semelhante ao relatado por Batista (2025), alcançando valores mínimos de 0,020 mg vaso⁻¹ (Figura 4F). As misturas de calcário com folhelho M1 e M2 (PRNT de 66,8% e 61,1%) apresentaram menor sensibilidade ao tempo de incubação, mantendo maiores teores relativos de Cu.

A maior absorção de Mn foi observada em M2 (PRNT 61,1%), com 45 dias de incubação, seguido do calcário DCE (PRNT 67,8%) no tempo 10 dias (Figura 4G), sendo que quanto maior o tempo de incubação, maiores foram os teores de absorção de Mn encontrados, como visto por Batista (2025).

Na medição de teor de Zn, as diferenças foram pequenas, mas na interação entre tempo e tipo de calcário e misturas, o tempo zero favoreceu levemente o teor, especialmente em M2 e M1 (PRNT 61,1% e 66,8%), período em que o solo se encontra mais ácido e apresenta maior disponibilidade de micronutrientes catiônicos. Sugere-se que, neste ponto, o efeito dominante não é a correção da acidez, mas sim, o aporte do próprio Zn como micronutriente presente nas impurezas dos materiais (calcário e/ou folhelho). Como o pH do solo ainda era baixo, o Zn adicionado estava totalmente solúvel e disponível para a absorção. Após 10 dias, os valores tenderam a estabilizar entre tratamentos (Figura 4H), indicando o início da reação da calagem, onde a elevação do pH induziu a insolubilização do Zn, superando o aporte inicial e conduzindo o sistema ao seu estado de equilíbrio esperado em solos corrigidos, similar ao observado por Moreira et al. (2024), em que o aumento da quantidade de calcário aplicada, reduziu o teor de Zn.

Ao avaliar o teor de Co, observou-se que a mistura M1 (PRNT 66,8%) apresentou o maior valor no tempo zero (Figura 4I). Verificou-se, ainda, que a concentração de Fe aumentou

com o tempo de incubação. Considerando que Fe e Co apresentam comportamentos semelhantes e competem pelos mesmos transportadores de metais divalentes (Vert et al., 2002), o aumento do teor de Fe tende a reduzir a disponibilidade e a absorção de Co, indicando que o teor de Co diminui com o maior tempo de incubação.

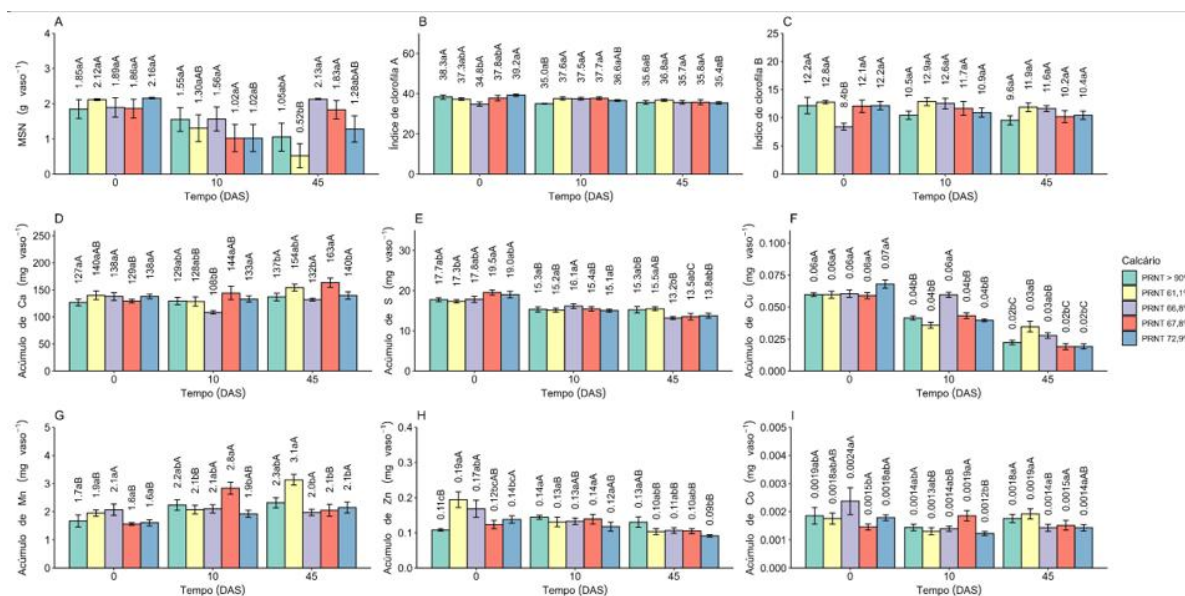


FIGURA 4 - MSN (A), índice de clorofila *a* (B), índice de clorofila *b* (C), teor dos seguintes macronutrientes: Ca (D), S (E), Cu (F), Mn (G), Zn (H) e Co (I) nas plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação, em função da interação entre os diferentes tipos de calcário e misturas (D, DCC, DCE, M1 e M2) e tempos de incubação distintos (0, 10 e 45 dias). Médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem entre si numa mesma condição de tempo de incubação, e seguidas por letra maiúscula não diferem entre si numa mesma condição de calcário. Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.5 Interação dose x tempo

Verificou-se também, para a interação entre as doses e os tempos, a dose técnica resultou em um maior teor de P (Figura 5) para o tempo de incubação de 45 dias, enquanto, para a dose uniforme o melhor valor encontrado foi quando não houve tempo de incubação, mas não houve diferença significativa entre os tempos (Ratke et al., 2021).

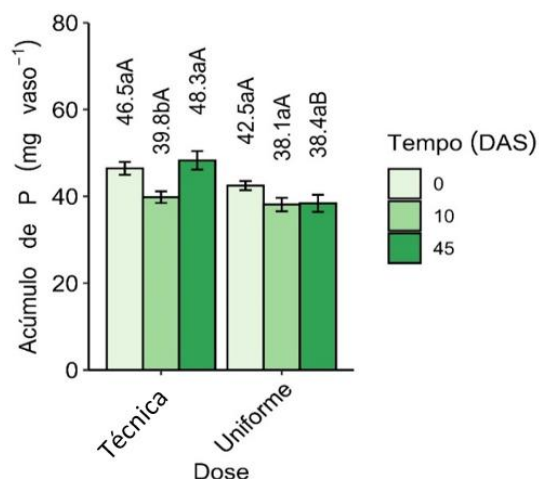


FIGURA 5 - Teor de P na parte aérea das plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função da dose técnica e da dose uniforme em diferentes tempos de incubação (0, 10 e 45 dias). Médias seguidas por mesma letra minúsculas não diferem entre si na mesma condição de dose e médias seguidas por mesma letra maiúscula não diferem entre si numa mesma condição de Tempo. As barras verticais representam o erro padrão da média.

4.6 Interação calcários e misturas x tempo x dose

Observou-se resultados significativos ao se avaliar a interação dos três fatores testados nesse experimento: tipos de calcário e misturas x tempo x dose, onde na medição de nutrientes, destacaram-se: P, Mg, B e Ni, conforme Figura 6.

Verificou-se que houve a tendência de maior teor de K (Figura 6A) com a utilização do calcário DCC (PRNT 72,9%) ao tempo de zero dias de incubação, na dose técnica, embora sem diferenças marcantes. Já na dose uniforme, houve maior teor de K com a aplicação de calcário DCE (PRNT 67,8%) aos zero dias. O tempo zero favoreceu o teor de K, similar aos resultados encontrados por Coutinho et al. (2008), pois o aumento de Ca e Mg que ocorreu de acordo com o maior tempo de incubação (10 e 45 dias) afeta diretamente a absorção de K pelas plantas (Oliveira et al., 2001).

O teor de Mg (Figura 6B) apresentou resultado significativo para dose técnica, onde M1 (PRNT 66,8%) aos zero dias de incubação apresentou maior teor de Mg, e os calcários DCE e M2 (PRNT 67,8% e 61,1%) tiveram o pior desempenho nos tempos de zero e 10 dias, enquanto, a dose uniforme, apresentou tendência similar, sendo o calcário D (PRNT >90%) mostrando melhores resultado aos 45 dias de incubação. O teor de Mg é fortemente influenciado pelo tempo de incubação e pela qualidade do calcário (Oliveira; Pavan, 1996; Caires et al., 2001), favorecendo assim, o resultado quando utilizados os calcários que possuem PRNT elevado.

O B acumulado (Figura 6C) na parte aérea das plantas apresentou resultados significativos, para a interação entre dose e os tipos de calcários e misturas, sendo que a dose técnica apresentou diferenças pequenas, mas valores ligeiramente maiores na mistura com PRNT 61,1% após 45 dias, enquanto que, a dose uniforme apresentou, maiores teor de B, sendo que não houve incubação (tempo de zero dias) para o calcário DCC (PRNT 72,9%), enquanto no tempo de incubação de 45 dias, o calcário DCE (PRNT de 67,8%) proporcionou mais eficiência, resultados estes, similares aos observados por Bossolani (2021), sendo que quando houve maior exposição ao calcário, resultou-se em valores menores na presença de micronutrientes.

No teor de Ni, para a dose técnica, observou-se melhor resultado para o calcário DCE (PRNT 67,8%) aos 10 dias de incubação. A disponibilidade de Ni no solo é fortemente dependente do pH. No estudo de Macedo et al. (2016), foi demonstrado que a saturação de bases mais elevada resulta em pH mais alto e consequentemente, reduz a disponibilidade de Ni de plantas de soja. Enquanto, para a dose uniforme, o teor de Ni apresentou os melhores resultados para M2 (PRNT 61,1%) tanto no tempo de incubação de 45 dias, quando de 0 dias (Figura 6D), pois calcários de PRNT mais baixos ou misturas com folhelho podem suavizar esse impacto de pH, permitindo que o Ni permaneça disponível por mais tempo, especialmente se o material fonte (como folhelho) liberar Ni ou facilitar complexação orgânica.

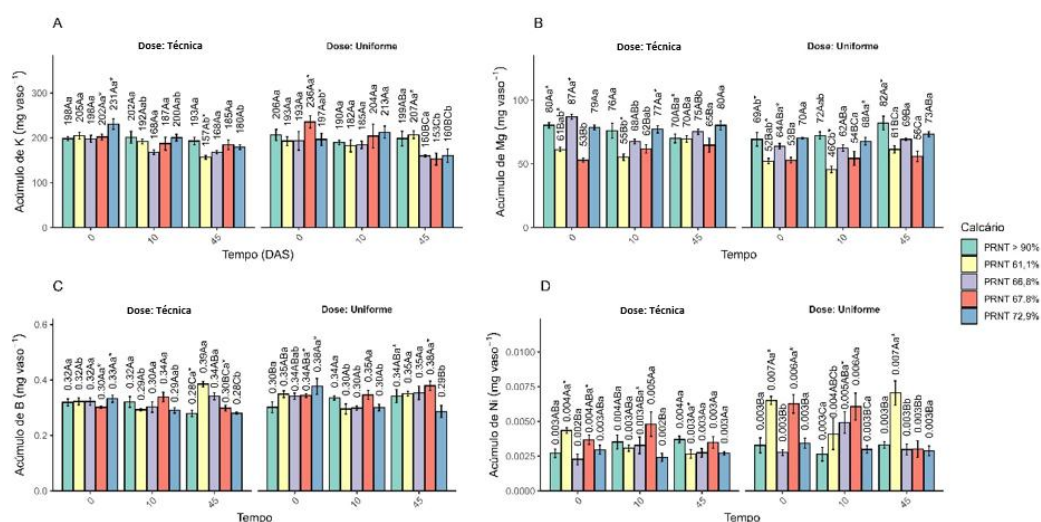


FIGURA 6 - Teor de K (A), Mg (B), B (C) e Ni (D) na parte aérea das plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tipo de calcário e das misturas (D, DCC, DCE, M1 e M2), de acordo com o tempo de incubação (0, 10 e 45 dias) e as doses de calcário calculadas (ajustada e uniforme). Médias seguidas por mesma letra maiúsculas não diferem entre si numa mesma condição de tempo de incubação e dose. Médias seguidas por mesma letra minúscula não diferem entre si numa mesma condição de calcário e dose. * indica diferença significativa entre as doses, para o mesmo tempo de incubação e calcário. Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.7 Variáveis fisiológicas – calcários e misturas

Além dos resultados acima mencionados, foi realizada a medição das variáveis fisiológicas das plantas, que são os processos internos que regulam o crescimento e interação desta com o ambiente. Das variáveis medidas, os resultados de estresse e fotossistema máximo não foram significativos.

Dentro das variáveis fisiológicas, ao se considerar o fator calcário e as misturas, o índice de clorofila total (Figura 7A) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, exceto uma tendência de maior valor com M2 (PRNT 61,1%), embora estatisticamente semelhante aos demais. Tendência essa, similar às observações realizadas por Mascarenhas et al. (2013), em que plantas com deficiência de S, tiveram menores resultados de teor de clorofila.

A maior relação entre clorofila *a/b* (Figura 7B) foi observada no tratamento com calcário D (PRNT>90%), diferindo significativamente de M2 (PRNT 61,1%). Os demais calcários e misturas apresentaram valores intermediários, sem diferença estatística entre si. Nogueira et al. (2010), avaliaram que os índices de clorofila mais altos proporcionaram uma taxa fotossintética elevada, resultando em maior teor de matéria seca nas plantas, e consequentemente, em maior área foliar.

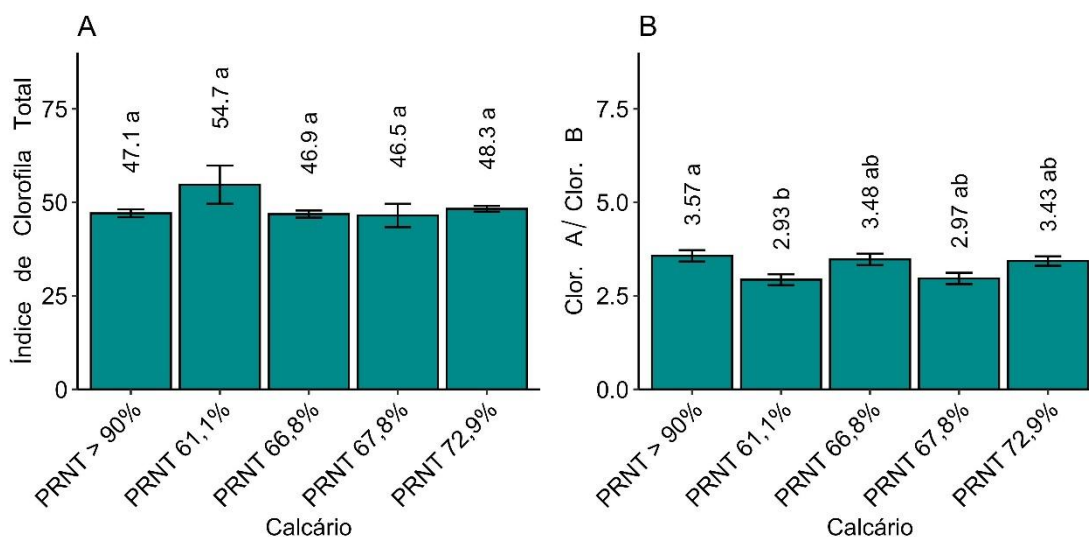


FIGURA 7 - Índice de clorofila total (A) e relação clorofila *a/b* (B) nas plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tipo de calcário e das misturas (D, DCC, DCE, M1 e M2). Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.8 Variáveis fisiológicas - tempo

Ao se considerar o fator tempo, destacaram-se os resultados das medições de centros de: reação, desempenho fotossintético, dissipação de energia e fluorescência inicial, conforme Figura 8.

A avaliação da eficiência dos centros de reação das plantas de soja mede a atividade dos Fotossistemas I e II, durante fotossíntese, localizados nas membranas dos tilacoides dos cloroplastos. O número de centros de reação foi menor quando não houve incubação, aumentando significativamente após 10 e 45 dias. Isso indica que a incubação favoreceu a ativação dos complexos fotossintéticos (Figura 8A). O teor de Fe observados anteriormente nos tempos de incubação de 10 e 45 dias, favoreceram a eficiência dos centros de reação e as atividades dos fotossistemas, que condizem com os resultados encontrados por Paula (2018), ao estudar os centros de reação, de acordo com a disponibilidade de Fe.

O desempenho fotoquímico mensurado nas plantas, apresentou aumento conforme se diminuiu o tempo de incubação dos calcários, passando de 0,521 (tempo de incubação de 45 dias) para 0,559 (zero dias). Inferindo que, quanto menor o tempo de incubação, maior o desempenho fotoquímico da planta, ou seja, sua capacidade de transformar a luz solar em energia química através da fotossíntese (Figura 8B), porém esse resultado não foi estatisticamente significativo. De acordo com os resultados obtidos por Santos et al. (2020), quanto maior índice de área foliar, maior foi a produção fotossintética, e consequentemente o desempenho fotoquímico, como observado em resultados citados anteriores neste trabalho, o maior tempo de incubação, ocasionou redução da área foliar e MSPA, o que condiz com o menor resultado de desempenho fotoquímico medido.

A dissipação de energia medida nas plantas, apresentou aumento com o tempo, de zero a 45 dias. Isso sugeriu maior perda de energia luminosa como calor quando o calcário foi incubado por mais tempo (Figura 8C). O aumento da dissipação de energia com o aumento do tempo de incubação, condiz com a resultado encontrado no desempenho fotoquímico, que aumentou de acordo, com a redução do tempo, por serem inversamente proporcionais (Trindade, 2020).

Na medição da fluorescência inicial, não houve diferença significativa entre os tempos, indicando estabilidade na excitação inicial dos pigmentos fotossintéticos, independentemente da incubação (Figura 8D). A modificação do solo (pH, Ca, Mg) com uso da calagem não foi suficientemente intensa para afetar a fotossíntese basal no período considerado (Trindade,

2020), ela melhorou a disponibilidade de nutrientes que compensaram efeitos adversos, como a redução de Al tóxico, mantendo F_0 estável.

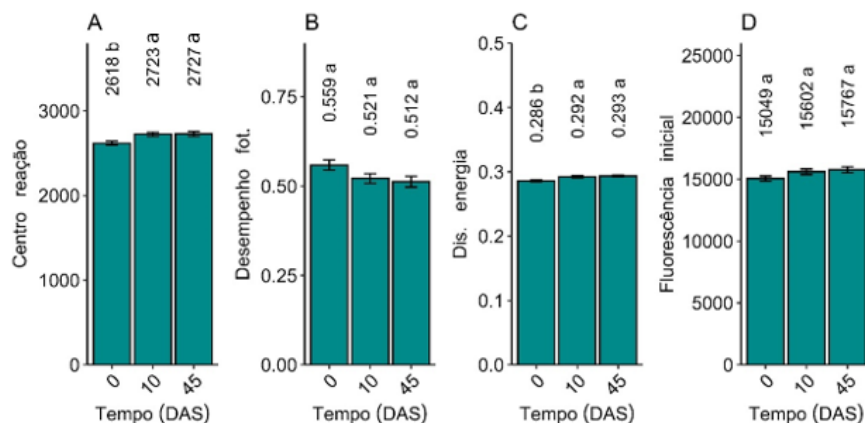


FIGURA 8 - Centros de reação (A), desempenho fotossintético (B), dissipação de energia (C) e fluorescência inicial (D) das plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tempo de incubação (0, 10 e 45 dias). Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$).

4.9 Variáveis fisiológicas – calcários e misturas x tempo

A medição de elétrons (Figura 9) em plantas de soja geralmente se refere à avaliação da taxa de transporte de elétrons (ETR), durante a fotossíntese, ou, em alguns contextos, à condutividade elétrica dos tecidos da planta ou de soluções em que as sementes foram embebidas. Com a medição no experimento, foi possível identificar que no tempo de incubação de zero dias (sem incubação), o tratamento D (PRNT > 90%) proporcionou menor fluxo de elétrons, seguido do calcário DCE (PRNT 67,8%), diferindo significativamente dos demais. Já M1 (PRNT 66,8%) proporcionou o maior valor. No tempo de incubação de 10 dias, o tratamento D (PRNT > 90%) proporcionou menor fluxo de elétrons, mas não houve diferenças significativas entre os calcários, com valores próximos, indicando uniformidade na resposta após curto período de incubação. Já no tempo de incubação de 45 dias, todos os tratamentos apresentaram desempenho semelhante, sem diferenças estatísticas. De acordo com resultados mencionados acima, verificou-se maior teor de Fe nos tempos de incubação de 10 e 45 dias, oriundos da aplicação da calagem, que corrige diretamente o pH, otimizando absorção de nutrientes que atuam como cofatores nas cadeias de transporte, fazendo com que o Fe, que é um ativador de enzimas (Mascarenhas et al., 2013) transporte mais elétrons.

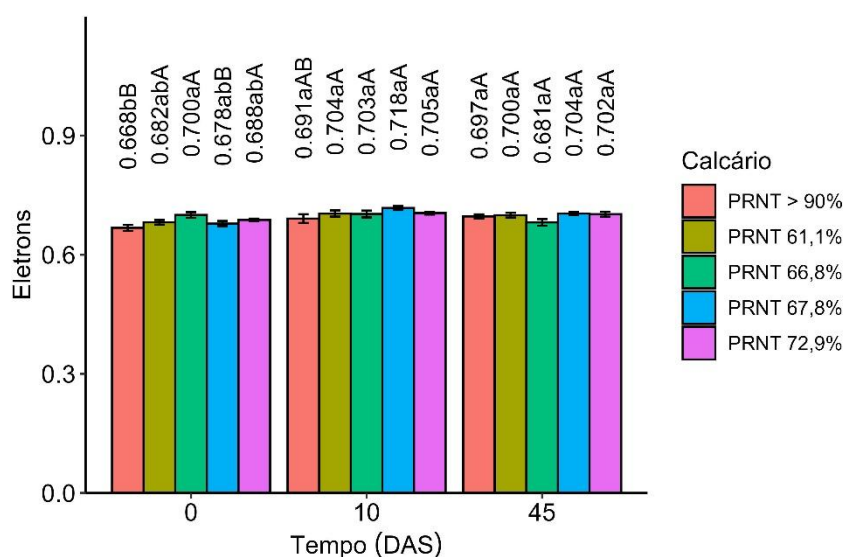


FIGURA 9 - Medição de elétrons em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tempo de incubação (0, 10 e 45 dias) associado a calcários e misturas com diferentes PRNT (D, DCC, DCE, M1 e M2). Médias seguidas por letras minúsculas no mesmo tempo e maiúsculas no mesmo calcário não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras verticais representam o erro padrão da média.

4.10 Análise canônica

A análise discriminante canônica foi realizada a partir dos dados transformados e evidenciou a eficácia diferenciada dos tratamentos com calcários e misturas de distintos PRNTs sobre o desenvolvimento da soja cultivada em vasos. O uso de distintos tipos de calcário visou corrigir a acidez e aumentar a fertilidade do solo, garantindo condições nutricionais adequadas ao cultivo vegetal (Rodrighero et al., 2015; Caires et al., 2011). O primeiro eixo canônico (Can1), responsável por 91,3% da variância total, discriminou em maior magnitude os tratamentos, especialmente os calcários: D, DCC, M1 (PRNT > 90%, 72,9%, e 66,8%) que se destacaram positivamente, em relação às demais fontes. Esses tratamentos apresentaram maior associação com variáveis indicativas de vigor vegetal, tais como: massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSR), número de folhas, diâmetro do caule e teores de N, S e Zn nas plantas. Ademais, a análise dos dados correspondentes à M1 indicou que esse tratamento foi responsável por grande parte dos resultados significativos observados neste experimento.

Em contraste, os tratamentos M2 e DCE (PRNTs de 61,1% e 67,8%, respectivamente) posicionaram-se em quadrantes opostos, refletindo menor desempenho produtivo e nutricional (Figura 10).

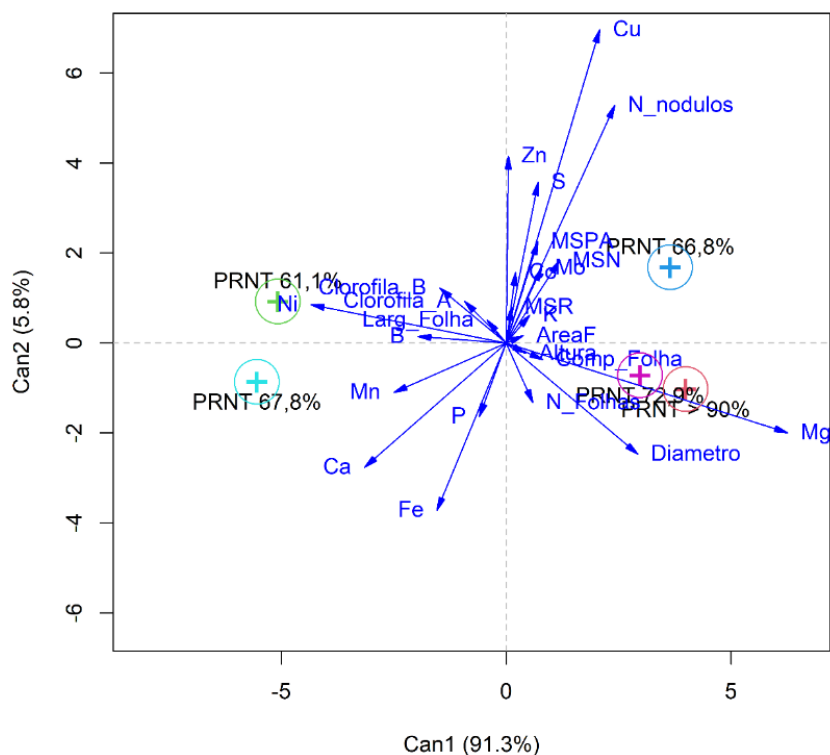


FIGURA 10 - Análise discriminante canônica com variáveis obtidas em plantas de soja, cultivadas em casa de vegetação em função do tempo de incubação (0, 10 e 45 dias) associado a calcários e misturas com diferentes PRNT (D, DCC, DCE, M1 e M2).

A aplicação de calcário na cultura da soja constitui uma prática essencial, para a correção da acidez do solo e o aumento da eficiência produtiva Torres (1993), favorecendo a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular das plantas (Conte et al., 2020).

Os calcários avaliados, os tempos de incubação e as doses aplicadas não influenciaram: altura de plantas, número de folhas, comprimento de folhas e largura de folhas.

O diâmetro do caule das plantas de soja foi maior quando cultivadas com o calcário D, DCC e M1 (PRNT>90%, 72,9% e 66,8%), e menor, quando cultivadas com M2 (PRNT 61,1%). Também, possuem maior diâmetro do caule as plantas cultivadas com os calcários incorporados ao solo 45 dias antes do plantio, independente dos calcários e doses utilizados.

A área foliar apresentou redução apenas aos 45 dias de incubação, enquanto a massa seca da parte aérea (MSPA) foi discretamente superior no tempo zero e a massa seca radicular (MSR) atingiu seu valor máximo aos 10 dias de incubação. Esses resultados indicam que a reação parcial do calcário logo após a aplicação favorece o desenvolvimento do sistema radicular, ao passo que períodos prolongados de incubação podem limitar a expansão foliar e o

acúmulo de biomassa, possivelmente em função da diluição da concentração de nutrientes móveis nos tecidos vegetais, decorrente de um crescimento vegetativo mais acelerado.

O maior número de nódulos foi observado no tratamento M1 (PRNT 66,8%), sugerindo que fatores além do PRNT, como o aporte mineral proveniente do folhelho, exerceram influência positiva sobre a simbiose. Quanto ao fator tempo, a nodulação foi mais expressiva na ausência de incubação, reduzindo-se acentuadamente aos 10 e 45 dias, comportamento coerente com o maior teor de Co no tempo zero, micronutriente diretamente relacionado à biossíntese da leg-hemoglobina e ao adequado funcionamento dos nódulos.

A massa seca de nódulos (MSN) reforçou esse padrão, apresentando valores superiores no tratamento M1 (PRNT 66,8%) em todos os tempos avaliados e maior magnitude na ausência de incubação, o que confirma a elevada sensibilidade da nodulação às interações entre pH, aporte mineral e tempo de reação da calagem.

Em relação aos macronutrientes, o experimento promoveu maior teor de Ca com o DCE (PRNT 67,8%) aos 45 dias, indicando que a incubação prolongada intensifica a disponibilidade desse nutriente, especialmente quando se aplicam calcários de reatividade intermediária. Para o S, o maior teor foi observado no tempo zero, com redução ao longo do período de incubação, refletindo a disponibilidade imediata do corretivo e a posterior diluição nos tecidos vegetais, acompanhando o crescimento da planta. Quanto ao Mg, o melhor desempenho ocorreu para M1 (PRNT 66,8%) no tempo zero, na dose técnica, enquanto a dose uniforme favoreceu o calcário D (PRNT > 90%) aos 45 dias, evidenciando que o tempo de incubação influenciou fortemente o suprimento de Mg. Para o P, a dose técnica proporcionou maiores teores, aos 45 dias de incubação, ao passo que a dose uniforme favoreceu o tempo zero, indicando que a antecipação da calagem altera as interações entre: P, Ca e Mg no solo.

No que se refere aos micronutrientes, o maior teor de Fe ocorreu com M2 (PRNT 61,1%), evidenciando a influência direta do aporte desse elemento proveniente do folhelho. O tempo de incubação de 45 dias promoveu maiores teores de Fe, reforçando a importância da correção gradual do solo para micronutrientes dependentes de transporte mediado por cofatores metálicos. Para o Zn, observou-se pequenas diferenças entre os tratamentos, com maior teor no tempo zero, especialmente em calcários de menor PRNT, devido à maior solubilidade do Zn em condições de pH mais baixo. Para o Mn, M2 (PRNT 61,1%) aos 45 dias promoveu maior absorção, em consonância com a tendência de aumento desse micronutriente com maior tempo de incubação. No caso do Cu, houve forte redução nos teores com o aumento do tempo de incubação, sendo as misturas com folhelho menos afetadas. Para o Co, o maior teor foi observado com M1 (PRNT 66,8%) no tempo zero; o aumento do Fe aos 45 dias reduziu a

absorção de Co, em função da competição por transportadores. Para o B, os maiores valores ocorreram no tempo zero, na dose uniforme, para o DCC (PRNT 72,9%), enquanto a dose técnica apresentou pequenas variações entre os calcários. Para o Ni, o maior teor foi observado no calcário DCE (PRNT 67,8%) aos 10 dias, na dose técnica; já na dose uniforme, M2 (PRNT 61,1%) foi mais eficiente, sugerindo que a presença de folhelho ou um PRNT mais baixo reduziu o impacto do aumento do pH, sobre a solubilidade do Ni.

Ao se considerar as variáveis fisiológicas, os índices de clorofila *a*, *b* e total apresentaram poucas diferenças entre tratamentos, exceto redução pontual para a mistura M1 (PRNT 68,8%) no tempo zero, indicando estresse inicial. A relação clorofila *a/b* foi maior no calcário D (PRNT>90%), sugerindo maior eficiência funcional dos complexos fotossintéticos.

O número de centros de reação foi menor no tempo zero, aumentando com a incubação, comportamento coerente com maior disponibilidade de Fe aos 45 dias, elemento essencial nos centros de transporte eletrônico. O desempenho fotoquímico foi ligeiramente maior no tempo zero, enquanto a dissipação de energia aumentou com o tempo, fenômenos inversamente proporcionais. A fluorescência inicial permaneceu estável entre tempos, sinalizando ausência de estresse fotossintético basal. O fluxo de elétrons variou mais intensamente no tempo zero, com diferenças desaparecendo aos 10 e 45 dias, indicando que a incubação homogeniza a resposta fisiológica independentemente do PRNT.

A análise discriminante reforçou que calcários de D e DCC de PRNT elevado (>90%, 72,9%) e M1 (PRNT 66,8%) foram os tratamentos mais associados ao vigor da soja, segundo variáveis-chave como: MSPA, MSR, número de folhas, diâmetro de caule e teores de N, S e Zn. Já M2 e DCE (PRNTs 61,1% e 67,8%) posicionaram-se como menos eficientes, confirmando o papel central da reatividade do calcário, na expressão do desempenho vegetal.

Os resultados do experimento demonstram que as misturas contendo folhelho apresentam desempenho agrônômico equivalente ou superior aos calcários sem mistura, tanto em variáveis morfológicas (diâmetro de caule, massa seca), quanto fisiológicas (fluorescência) e simbióticas (nodulação). Além disso, não foram observados efeitos negativos sobre o balanço nutricional, especialmente para o Fe, nutriente potencialmente impactado pela composição mineralógica do folhelho.

A incorporação desse material ao sistema produtivo permitiu sua reintrodução no ciclo agrícola, contribuindo para uma destinação ambientalmente adequada e agregando valor a um resíduo mineral. Além disso, quando associadas a calcários com PRNT intermediário, essas misturas têm demonstrado potencial para reduzir os custos de aplicação, mantendo níveis

adequados de correção da acidez e eficiência no fornecimento de cálcio e magnésio às plantas (CFSEMG, 2016; EMBRAPA, 2018).

Conforme os resultados obtidos neste estudo, observou-se que a mistura de calcário com folhelho apresentou desempenho agrônômico satisfatório, evidenciando seu potencial como coproduto para substituição parcial dos calcários convencionais. Essa alternativa mostra-se tecnicamente viável, de menor custo e ambientalmente adequada para o aproveitamento do folhelho, atualmente considerado um subproduto do processo de extração do calcário e que demanda destinação ambientalmente segura. Sua utilização no processo de correção e condicionamento do solo proporciona benefícios adicionais, associados tanto aos nutrientes presentes em sua composição quanto ao aproveitamento sustentável de materiais sedimentares disponíveis regionalmente, contribuindo para a redução dos impactos ambientais decorrentes da deposição de resíduos minerais.

5 CONCLUSÃO

Diante da pesquisa realizada e do experimento conduzido chegou às seguintes conclusões:

Os resultados indicaram que os tipos de calcário, as doses e os tempos de incubação não influenciaram as variáveis morfológicas básicas da soja, como: altura de plantas e características foliares.

Contudo, o diâmetro do caule foi favorecido por calcários de maior reatividade e por misturas contendo folhelho, especialmente quando aplicados com antecedência de 45 dias, evidenciando efeito positivo da calagem antecipada, sobre o vigor estrutural das plantas.

A dinâmica do tempo de incubação mostrou-se determinante para o desenvolvimento: radicular, nodulação e teor de nutrientes. A ausência ou curto período de incubação favoreceu: o crescimento radicular, a nodulação e o teor de Co, enquanto períodos mais longos intensificaram a disponibilidade de Ca e influenciaram a absorção diferencial de macro e micronutrientes, em função das interações entre: pH, reatividade do corretivo e composição mineralógica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU-JUNIOR, C. H. et al. Soybean Seed Enrichment with Cobalt and Molybdenum as an Alternative to Conventional Seed Treatment. **Plants**, v. 12, p. 1164, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12051164>. Acesso em: 16 de nov, 2025.

ANDRIOLO, J. L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Santa Maria: UFSM, 1999. 142p.

ASSMANN, T. S. *et al.* Potencial de suprimento de micronutrientes de calcário oriundo da mineração de folhelho pirobetuminoso da formação Irati-PR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 963-969, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400023>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

AYALA, S.; RAO, E. V. S. P. Perspectives of soil fertility management with a focus on fertilizer use for crop productivity. **Current Science**, 82(7), 797–807, 2002. Disponível: <http://www.jstor.org/stable/24106725>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

BATISTA, P. H. D. **Efeitos Residual da Calagem nos Atributos**. Lavras: UFLA, 2025.

BOSSOLANI, J. W. *et al.* Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **Elsevier**, v. 128, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126308>. Acesso em: 13 de nov. 2025.

BRANCO, J. E. H. *et al.* Mutual analyses of agriculture land use and transportation networks: The future location of soybean and corn production in Brazil. **Agricultural Systems**, 194, 103264, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103264>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

BRASIL. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG). **Manual de calagem e adubação para o Estado de Minas Gerais**. 5. aproximação. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2016. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/62705587/5-aproximacao-revisada>. Acesso em: 09 de nov. de 2025.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. "Limestone". **Encyclopedia Britannica**, 2024. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/limestone>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

CAIRES, E. F. *et al.* Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.125-136, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100013>. Acesso em: 11 de ago. de 2024.

CAIRES, E. F. *et al.* Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Ciência do Solo**, v. 25, p. 1029-1040, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000400025>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem superficial em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 315-327, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/z3kWyhzMMY3PdVXdBDmpp8h/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 de nov. 2025.

CASSOL, C. J. *et al.* Natural fertility and intrinsic fragility of soils in the Brazilian Cerrado. **Rev Agro Amb**, v. 16, n. 2, e10087, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n2e10087>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

CATTELAN, A.J.; AGNOL, A.D. The rapid soybean growth in Brazil. **OCL** 25(1), D102, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017058>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

CONTE, O. *et al.* Manejo do solo. In: **EMBRAPA SOJA**. Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 55–80. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1128396>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

COSTA, N. L. *et al.* Aspectos da importância do complexo soja no Brasil e no Rio Grande do Sul: 1997 – 2017. **Redes**, 25(4), 1840-1863, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17058/redes.v25i4.12735>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

COUTINHO, E. L. M. *et al.* Produção e estado nutricional da soja em função da calagem. **Nucleus**, v. 5, n. 2, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.3738/nucleus.v5i2.79>. Acesso em: 02 de nov. 2025.

CUNHA, L. M., FERREIRA, T. R., & GOMES, A. P. Uso de folhelhos como matéria-prima complementar na indústria do cimento. **Cerâmica**, v. 65(375), p. 321–330, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/3FybtBWKMPqCKSXhVnQvp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 de nov. 2025.

DALCHIAVONL, F.C. *et al.* Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 453-461, jul-set, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300006>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

DOS ANJOS, A. **Estudo da formação Irati - São Mateus do Sul, PR, como corretivo da acidez do solo**. 128 f. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1991.

EMBRAPA. **Soja: práticas de manejo e correção do solo para alta produtividade**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca1092757/1/FolderinstitucionalEmbrapaSojaCBSOJA2018.pdf>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

FAGERIA, N. K.; GHEYI, H. R. **Efficient crop production**. Campina Grande: UFPB, 1999. 548 p.

FAGERIA, N. K. *et al.* Índices de acidez ótima para a produção de soja em Latossolos Brasileiros. **Comunicações em Ciência do Solo e Análise de Plantas**, 44(20), 2941–2951, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.829484>. Acesso em: 05 de nov. 2024.

FAGERIA, N. K., AND L. F. STONE. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39: 73–78, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2004000100011>. Acesso em: 05 de nov. 2024.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36(11), 1419–1424, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2001001100013>. Acesso em: 05 de dez. 2023.

FREITAS, M. A cultura da soja no brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, [S. l.], v. 7, n. 12, 2011. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/4287>. Acesso em: 12 de fev. 2024.

GOEDERT, W.J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. **Journal of Soil Science**, v.34, p.405-428, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01045.x>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

GREENSMITH, J. T. Limestones. In: **Petrology of the Sedimentary Rocks**. Dordrecht: Springer, 1989. Cap. 7, p. 103-140. https://doi.org/10.1007/978-94-011-9640-6_7. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-9640-6_7. Acesso em: 11 de ago. 2024.

HARRISON, R. B.; STRAHM, B. D. Soil Formation. **Encyclopedia of Ecology**, 3291–3295, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00297-4>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

HU, X.; WEI, X.; LING, J.; CHEN, J. Cobalt: An Essential Micronutrient for Plant Growth? **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>. Acesso em: 16 de nov. 2025.

JORIS, H. A. W. *et al.* Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, 162, p. 68–77, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.009>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

JORIS, H. A. W. *et al.* Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**. 365, p. 409-424, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

KALKHORAN, S. S. *et al.* Soil acidity, lime application, nitrogen fertility, and greenhouse gas emissions: Optimizing their joint economic management. **Agricultural Systems**, 176, 102684, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102684>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

KETEMA, P.; TEFERA, T. Time of Lime Application on Food Barely Yield in Acid Soil in Gumer Woreda, Guraghe Zone Ethiopia. **J Soil Water Sci**, v. 6(1), p. 286-289, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36959/624/455>. Acesso em: 22 de nov. 2025.

KLEIN, C.; DUTROW B. Assembleias Minerais: Introdução aos Tipos de Rochas. In: **Manual de Ciência dos Minerais**. Porto Alegre: Bookman, 2012. Ed. 23, cap. 21, p. 604-633.

KUNHIKRISHNAN, A. *et al.* Functional Relationships of Soil Acidification, Liming, and Greenhouse Gas Flux. **Advances in Agronomy**, 1–71, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.001>. Acesso em: 11 de nov. 2025.

LANGE, A. *et al.* Incubação de calcário finamente moído e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. **Nativa**, v. 10, n.4, p. 585-594, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i4.14146>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

LI, Y.; REN, S. Building Decorative Stone. In: **Building Decorative Materials (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering)**. Woodhead Publishing, 2011. cap. 3, p. 25-53. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857092588.25>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

MACEDO, F. G. *et al.* Nick availability in soil as influenced by liming and its role in soybean nitrogen metabolism. **Front. Plant Sci.**, v. 7: 1358, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01358>. Acesso em: 16 de nov. 2025.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS 1997. 201 p.

MARANHÃO, R. L. A. *et al.* The Spatiotemporal Dynamics of Soybean and Cattle Production in Brazil. **Sustainability**, 11(7), 2150, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11072150>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

MARTINS, D. E., PITELLI, R.A. Efeito da adubação fosfatada e da calagem nas relações de interferência entre plantas de soja e capim-marmelada. **Planta Daninha**. v. 18, n. 2, p. 331–347, 2000. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/bb2004b8-2590-4525-ae64-afc0ad8df61e/content>. Acesso: 13 de nov. 2025.

MASCARENHAS, H. A. A. *et al.* Deficiência e toxicidade visuais de nutrientes em soja. **Nucleus**, v. 10, n. 2, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3738/1982.2278.974>. Acesso em: 16 de nov. 2025.

MASCARENHAS, H.A.A. *et al.* Efeitos da calagem nas características químicas do solo e na nutrição de soja em Latossolo Roxo distrófico. **Bragantia**, 35:273-278, 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051976000200004>. Acesso em: 11 de ago. 2025.

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, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105860>. Acesso em: 01 de nov. 2024.

MORAES, F. A. *et al.* Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European Journal of Agronomy**, v. 144, p. 1-14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

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. **Elsevier**, v. 154, n. 127074, p. 127074, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127074>. Acesso em: 10 de nov. 2025.

MOREIRA, S. G. Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage S. **Acta Scientiarum**, v. 39, n. 1, p. 89-97, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30691>. Acesso em: 16 de nov. 2025.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M. Avaliação da eficiência agronômica de frações granulométricas de um calcário dolomítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, n. 1, p. 55-62, 1994. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Avalia%20-da-efici%C3%A2ncia-agron-Natale-Coutinho/221a22507c952db>. Acesso em: 11 de nov. 2025.

NOGUEIRA, P. D. M., JÚNIOR, D. G. S., RAGAGNIN, V. A. Clorofila foliar e nodulação em soja adubada com nitrogênio em cobertura. **Global Science and Technology**, v. 3, p.117–124, 2010. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/847378040/Clorofila-foliar-e-nodulacao-em-soja-adubada-com-N-em-cobertura>. Acesso em: 11 de nov. 2025.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Vol. 6, no 1, 2004. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/410>. Acesso em: 11 de nov. 2025.

NOLLA, A. **Crítérios para a calagem no sistema plantio direto**. 152 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000200016>. Acesso em: 10 de nov. 2025.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 47-57, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01021-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01021-5). Acesso em: 09 de nov. 2025.

ORTEGA, E. *et al.* Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis With an Expanded Scope. **Bulletin of Science, Technology & Society**, 25(4), 323–334, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0270467605278367>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

PASSEY, Q. R *et al.* **From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir**. SPE 131350. In: INTERNATIONAL OIL AND GAS CONFERENCE AND EXHIBITION IN CHINA, 2010, Beijing. Proceedings [...]. Beijing: Society of Petroleum Engineers, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/131350-MS>. Acesso em: 15 de nov. 2025.

PAULA, L. S. **Ação dos brassinosteróides sobre a fluorescência de clorofilas e trocas gasosas em plantas de soja sob deficiência de ferro**. Paragominas: UFRA, 2018.

POTTER, P. E.; MAYNARD, J.B.; DEPETRIS, P.J. **Mud and Mudstones**. Berlin: Springer Verlag, 2005. 297 p.

POLESSO, A. M. *et al.* Levantamento da fertilidade do solo de propriedades rurais do município de Chapecó -SC: um estudo de caso. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 18, n. 01, p. 72-86, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24021/raac.v18i1.5296>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

QUAGGIO, J.A. *et al.* Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 28:375-383, 1993. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/105402/respostas-da-soja-a-aplicacao-de-calcario-e-gesso-e-lixiviacao-de-ions-no-perfil-do-solo>. Acesso em: 11 de nov. 2024.

RATKE, R. F. *et al.* Propriedades químicas do solo e morfologia radicular da soja sob aplicação de diferentes granulometrias de calcário. **Revista Em Agronegócio E Meio Ambiente**, v. 14(2), p. 469–481, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e8234>. Acesso em: 13 de nov. 2025.

R CORE TEAM. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria. 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 25 de set. 2025.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1723-1736, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150036>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

SANTOS, A. S. *et al.* Morphological characteristics and soybean yields after using different limestone sources. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14(8), p. 1328–1334, 2020. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.795106167690701>. Acesso em: 13 de nov. 2025.

SCHIEBER, J.; ZIMMERLE, W. The history and promise of shale research. *In: Shales and Mudstones Basin Studies, Sedimentology and Paleontology. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*, v. 1, p. 1-10, 1998 Disponível em: <https://sepm04.sitehost.iu.edu/PDF/JS-B8-1998-INTBOOK.pdf>. Acesso em: 15 de mai. 2024.

SCHÖN, J. H. Rocks-Their Classification and General Properties. *In: Developments in Petroleum Science. Elsevier*, 2015. v. 65, c. 1, p. 1–19. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100404-3.00001-9>. Acesso em: 01 de ago. 2024.

SOUZA, J. C., SILVA, R. P., & OLIVEIRA, A. M. Caracterização de folhelhos associados a depósitos carbonáticos e implicações industriais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 47(2), p. 215–228, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/36667>. Acesso em: 15 de nov. 2025.

SUMNER, M. E.; NOBLE, A. D. Soil acidification: the world story. Handbook of soil acidity, p. 15-42, 2003. **CRC Press**. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780203912317>. Acesso em: 13 de nov. 2025.

TEIXEIRA, W. G. *et al.* Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. **Revista Brasileira Ciência Solo**, 44: e0200078, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200078>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

TEIXEIRA, L. S. M. *et al.* **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília: MAPA, 2017b.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: EMBRAPA, 2017a.

TOLOI, M.N.V. *et al.* Development Indicators and Soybean Production in Brazil. **Agriculture**. 11, 1164, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture11111164>. Acesso em: 05 de ago. 2024.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GALERANI, P. R. Manejo do solo para a cultura da soja. Londrina: **EMBRAPA-CNPSO**, 1993. 71 p. (Circular Técnica, 12). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/449022>. Acesso em: 09 de nov. 2025.

TRINDADE, P. R. **Sensores portáteis para avaliação do nitrogênio na soja e avaliação do crescimento de raiz de milho com bioestimulante**. Rio Verde: IF Goiano, 2020.

VERT, G. *et al.* An Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. **Plant Cell**. v. 14(6), p. 1223-33, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1105/tpc.001388>. Acesso em: 16 de nov. 2025.

ZAN, N. R. *et al.* Prediction of the solubility of zinc, copper, nickel, cadmium, and lead in metal-contaminated soils. **Environmental Monitoring and Assessment**, 185(12), 10015–10025, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3309-x>. Acesso em: 11 de ago. 2024.

ZONTA, J. H. *et al.* Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18(6), p. 595–602, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1415-43662014000600005>. Acesso em: 05 de ago. 2024.