



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

DOZE BATISTA DE OLIVEIRA

**NECESSIDADE DE CALCÁRIO E GESSO PARA O CULTIVO DE SOJA EM
NOVAS ÁREAS AGRÍCOLAS DE LATOSSOLO NO CERRADO DO MATOPIBA,
BRASIL**

Bom Jesus – PI

2024

DOZE BATISTA DE OLIVEIRA

**NECESSIDADE DE CALCÁRIO E GESSO PARA O CULTIVO DE SOJA EM
NOVAS ÁREAS AGRÍCOLAS DE LATOSSOLO NO CERRADO DO MATOPIBA,
BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda

Coorientador: Dr. Henrique Antunes de Souza

Bom Jesus – PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Campus Professora Cinobelina Elvas
Serviço de Processamento Técnico

- O48n** Oliveira, Doze Batista de.
Necessidade de calcário de gesso para o cultivo de soja em novas áreas agrícolas de latossolo no Cerrado Matopiba, Brasil./ Doze Batista de Oliveira. – 2024.
69 f.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI, 2024.
Orientação: “Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda”.
1. Soja-cultivo. 2. Solo-acidez. 3. Solo-fertilidade.
4. Glycine max. I. Oliveira, Doze Batista de.
II. Lacerda, Julian Junio de Jesús. III. Título.

CDD 631.422

Elaborado por Sérvulo Fernandes da Silva Neto – CRB-15/603

DOZE BATISTA DE OLIVEIRA

NECESSIDADE DE CALCÁRIO E GESSO PARA O CULTIVO DE SOJA EM NOVAS ÁREAS AGRÍCOLAS DE LATOSSOLO NO CERRADO DO MATOPIBA, BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Ciência do Solo.

Linha de Pesquisa: Fertilidade, Biologia do Solo e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda.

Coorientador: Dr. Henrique Antunes de Souza.

Aprovada em: 30 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda (UFPI)
Orientador

Dr. Henrique Antunes de Souza (EMBRAPA)
Coorientador

Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega (UFRB)
Examinador Interno ao Programa

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires (UEPG)
Examinador Externo ao Programa

Prof^a. Dr^a. Tangriani Simioni Assmann (UTFPR)
Examinadora Externa ao Programa

Dr. Edvaldo Sagrilo (EMBRAPA)
Examinador Interno ao Programa

À minha esposa Janilda Barros Santiago Oliveira, que sempre me apoiou nessa trajetória e muitas vezes me motivando a superar os desafios. Às minhas filhas, Lorena Santiago Oliveira, Lívia Santiago Oliveira e Iara Rocha Oliveira que, mesmo precisando da minha presença como pai, foram pacientes compreendendo a importância dessa minha caminhada em direção ao conhecimento. À mãe, Domingas da Silva, que sempre me incentivou a superar os desafios. E em memória a meu pai, Raimundo Batista de Oliveira, que, apesar de ser um autodidata, era apaixonado pela educação.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as entidades e indivíduos que tornaram possível a realização desta jornada acadêmica. Primeiramente, agradeço a Deus pela força e orientação ao longo de todo esse percurso, guiando-me nos momentos desafiadores e inspirando-me nas conquistas.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, meu sincero agradecimento por proporcionar um ambiente acadêmico tão enriquecedor. Agradeço especialmente ao corpo docente e à administração por oferecerem suporte e recursos necessários para a realização deste projeto.

Agradeço imensamente ao Dr. Julian Junio de Jesús Lacerda pela sua orientação, suporte durante todo o curso. Sua experiência e dedicação foram essenciais para o êxito desta pesquisa.

Agradeço ao Dr. Henrique Antunes de Souza e à EMBRAPA Meio Norte pelo suporte durante todas as fases da pesquisa. A parceria entre as instituições foi de suma importância para a realização da pesquisa.

Agradeço a Adenilson Pereira Cavalcante e a Allana Pereira Moura e Silva, representando o núcleo de fertilidade de solo, por me auxiliar em todas as fases da pesquisa. O apoio de vocês foi de grande relevância para a condução dos trabalhos.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade Federal do Piauí, em particular ao colega Estefenson Marques Moraes, agradeço a ajuda na condução das análises laboratoriais e a amizade sincera.

Expresso minha gratidão à família Pieta da Fazenda União, pela colaboração e suporte na realização deste trabalho. A participação de vocês foi fundamental para o progresso e execução das atividades práticas desta pesquisa.

À APROSOJA-PI, por meio de sua diretoria e associados, meu profundo agradecimento, pelo apoio ao trabalho. Sua colaboração foi vital para a execução e sucesso deste estudo.

Não posso deixar de expressar meu reconhecimento aos servidores da Universidade Federal do Piauí, cujo trabalho nos bastidores contribuiu para o funcionamento eficiente da instituição.

À todos meu muito obrigado.

No solo, onde átomos se entrelaçam e moléculas dançam, a química revela os segredos da fertilidade e sustenta a vida das plantas.

RESUMO

A utilização de doses elevadas de corretivos em áreas recentemente abertas para cultivo de grãos em regiões de expansão agrícola vem aumentando, uma vez que favorece a rápida melhoria da fertilidade do solo e permite alcançar níveis produtivos satisfatórios a curto prazo. Contudo, existem lacunas de conhecimento sobre as altas dosagens de calcário e gesso em solos do Cerrado, especialmente no estado do Piauí. Este trabalho buscou investigar os impactos da aplicação de grandes quantidades de calcário e gesso em áreas de cultivo na região do Cerrado no sudoeste do Piauí. O estudo foi realizado ao longo das safras de 2019/2020 e 2020/2021, em uma área de Latossolo Amarelo, em parcelas subdivididas com 4 repetições. As doses testadas de calcário foram 0, 5, 10, 15 e 20 t ha⁻¹ e de gesso foram 0, 1, 2 e 4 t ha⁻¹. A dosagem padrão de calcário foi estabelecida em 5 t ha⁻¹ e a de gesso em 1 t ha⁻¹. Foram avaliados aspectos da fertilidade do solo (nas profundidades de 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m), a condição nutricional das plantas, informações biométricas e a produção de soja. A produtividade de grãos com a aplicação de 10 t ha⁻¹ de calcário aumentou em 18% e 12% em comparação à dosagem padrão para os anos de 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente. Altas quantidades de calcário levaram a uma diminuição nas concentrações de P, K e de micronutrientes catiônicos no solo, resultando na queda dos teores desses elementos nas folhas da soja. Observou-se, no entanto, um aumento nas concentrações de Ca, Mg e S na camada subsuperficial, alcançando níveis considerados adequados e semelhantes aos recomendados para a camada superior (0,0-0,2 m). A combinação de gesso e calcário em áreas de cultivo de soja na primeira safra resulta em uma rápida melhoria das características químicas do solo, diminuindo os níveis de acidez. A utilização de altas quantidades de calcário (10 t ha⁻¹) é essencial para aprimorar as condições do solo na região do Matopiba, considerando o tempo limitado para que as reações químicas se realizem, o que possibilita o plantio da soja em áreas de Cerrado que foram recentemente transformadas para a agricultura.

Palavras-chave: Acidez do solo, Fertilidade do solo, *Glycine max*, Neutralização do alumínio, Tempo para correção.

ABSTRACT

The use of high doses of soil amendments in newly cleared areas for grain cultivation in regions of agricultural expansion has been increasing, as it promotes the rapid improvement of soil fertility and allows for short-term productivity gains. However, there are knowledge gaps regarding the high dosages of lime and gypsum in Cerrado soils, especially in the state of Piauí. This study aimed to investigate the impacts of applying large amounts of lime and gypsum in cultivated areas of the Cerrado region in southwestern Piauí. The research was conducted over the 2019/2020 and 2020/2021 cropping seasons in a Yellow Latosol area, using split plots with 4 replications. The tested lime doses were 0, 5, 10, 15, and 20 t ha⁻¹ and the gypsum doses were 0, 1, 2, and 4 t ha⁻¹. The standard dosage for lime was set at 5 t ha⁻¹ and for gypsum at 1 t ha⁻¹. Soil fertility aspects (at depths of 0.0-0.2, 0.2-0.4, and 0.4-0.6 m), plant nutritional status, biometric data, and soybean yield were evaluated. Grain productivity with the application of 10 t ha⁻¹ of lime increased by 18% and 12% compared to the standard dosage for the years 2019/2020 and 2020/2021, respectively. High quantities of lime led to a decrease in the concentrations of P, K, and cationic micronutrients in the soil, resulting in lower levels of these elements in soybean leaves. However, there was an increase in Ca, Mg, and S concentrations in the subsurface layer, reaching levels considered adequate and similar to those recommended for the top layer (0.0-0.2 m). The combination of gypsum and lime in soybean cultivation areas during the first season results in a rapid improvement of the soil's chemical characteristics, providing optimal acidity levels. The use of large amounts of lime (10 t ha⁻¹) is essential to enhance soil conditions in the Matopiba region, considering the limited time for chemical responses, enabling soybean planting in recently converted Cerrado areas for agriculture.

Keywords: Aluminum neutralization, Correction time, *Glycine max*, Soil acidity, Soil fertility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do município e do local do experimento, Fazenda União, Currais, Piauí, Brasil.....	24
Figura 2 - Precipitação média mensal obtida em pluviômetros na área do experimento no período de novembro de 2019 a abril de 2021 e médias históricas a partir de uma série de dados de 30 anos Currais, Piauí, Brasil.....	25
Figura 3 - Croqui do experimento.....	27
Figura 4 - Valores de pH do solo em função das doses de calcário e da interação entre as doses de calcário e gesso no ano agrícola de 2019/2020, Currais, Piauí, Brasil....	33
Figura 5 - Dados referentes a Fe, Mn e Zn em função das doses de calcário, e V e m% em função das doses de gesso na safra 2019/2020, Currais, Piauí, Brasil.....	34
Figura 6 - Valores de CTC, V%, m%, Ca, SB e $S-SO_4^{2-}$ em função das doses de calcário e de gesso e de suas interações no ano agrícola de 2019/2020, Currais, Piauí, Brasil.....	35
Figura 7 - Dados de pH, P, K, Ca, Mg, Al, H + Al, SB e CTC em função das doses de calcário nas profundidades 0,0–0,10, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, no ano agrícola de 2020/2021, Currais, Piauí, Brasil.....	39
Figura 8 - Dados de V%, m%, $S-SO_4^{2-}$ e Fe em função das doses de calagem, e de $S-SO_4^{2-}$ e Cu em função das doses de gesso nas profundidades de 0,0-0,10, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, no ano agrícola de 2020/2021, Currais, Piauí, Brasil.....	44
Figura 9 - Teores de Ca, Mg e Ca + Mg não trocáveis em função das doses isoladas de calcário, da interação entre doses de calcário e gesso, e de Mg não trocável em função das doses isoladas de gesso na camada de 0,0–0,2 m do solo, nas safras de 2019/2020 e 2020/2021, Currais, Piauí, Brasil.....	46
Figura 10 - Teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn nas plantas em função das doses de calcário nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.....	48
Figura 11 - Teores foliares de Ca, Mg, S, K, B e Zn em plantas de soja em resposta a doses de gesso nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.....	49
Figura 12 - Altura da planta e diâmetro do caule de plantas de soja em resposta a doses de calcário e gesso nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.....	52

Figura 13 - Massa seca da parte aérea, massa seca da raiz, volume de raiz e produtividade da soja em resposta a doses de calcário e gesso nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.....	53
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Atributos químicos e granulométricos determinados antes da instalação da área experimental nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em área de Cerrado	26
Tabela 2 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0-0,2 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado, Currais, Piauí	32
Tabela 3 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,2-0,4 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado, Currais, Piauí	36
Tabela 4 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,4-0,6 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado, Currais, Piauí	38
Tabela 5 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0-0,2 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais, Piauí	40
Tabela 6 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,2-0,4 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais, Piauí	42
Tabela 7 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,4-0,6 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais, Piauí	43
Tabela 8 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação (CV) para Ca, Mg e Ca + Mg não trocáveis no solo (0,0-0,2 m) em função de diferentes doses de calagem e gesso na soja (safras 2019/2020 e 2020/2021) em uma área de Cerrado, Currais, Piauí, Brasil	45
Tabela 9 -	Valores médios de calcário residual (Ca + Mg não trocáveis) em função de doses de calcário e gesso na cultura da soja, camada 0,0-0,2 m, Currais, Piauí	45
Tabela 10 -	Valores médios, teste F e coeficiente de variação de macro e micronutrientes na folha diagnóstica em função da aplicação de doses de calcário e gesso na	47

cultura da soja (safras 2019/2020 e 2020/2021) em área de Cerrado, Currais,
Piauí

Tabela 11 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de dados biométricos,
acúmulo de biomassa e produtividade da soja em função da aplicação de
doses de calcário e gesso (safra 2019/2020) em área de Cerrado, Currais,
Piauí

50

Tabela 12 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de dados biométricos,
acúmulo de biomassa e produtividade da soja em função da aplicação de
doses de calcário e gesso (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais,
Piauí

51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Cultura da soja.....	17
2.2	Solos ácidos.....	18
2.3	Solos do Cerrado.....	19
2.4	Calagem.....	20
2.5	Gessagem.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1	Descrição da área experimental.....	24
3.2	Delineamento experimental, tratamentos e manejo.....	27
3.3	Atributos analisados.....	28
3.4	Análise dos dados.....	30
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Fertilidade do solo no primeiro ano de cultivo.....	31
4.2	Fertilidade do solo no segundo ano de cultivo.....	39
4.3	Cálcio e magnésio não trocáveis nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021.....	44
4.4	Estado nutricional da soja nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021.....	46
4.5	Dados biométricos e produtividade da soja nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021.....	50
5	DISCUSSÃO.....	55
6	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A soja tem grande importância para a agricultura brasileira, respondendo por 49,52% da produção de grãos no país (CONAB, 2024). No ano agrícola 2022/2023, a produção de grãos de soja no Brasil foi de aproximadamente 153,6 milhões de toneladas, a partir de em uma área cultivada de 43,5 milhões de hectares (CONAB, 2023). Esta produção representa em torno de 41% da produção mundial de soja (Valdes; Gillespie; Dohlman, 2023). A atual área de expansão da soja no Cerrado ocorre de forma mais intensa na região conhecida como Matopiba, acrônimo que combina as iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. O Matopiba abrange 337 municípios, distribuídos em uma área de 73 milhões de ha (Lima *et al.*, 2019). Os estados que compõem o Matopiba cultivam soja em uma área de aproximadamente 5,13 milhões de hectares, o que equivale a aproximadamente 12,5% da produção nacional deste grão (IBGE, 2023).

O Matopiba é considerado uma região estratégica para o desenvolvimento econômico do país, sendo que essa fronteira agrícola tem atraído agricultores de várias partes do Brasil, em sua maioria, estimulados pelos baixos preços da terra e por uma topografia favorável à mecanização (Pires *et al.*, 2016; Lustosa Filho *et al.*, 2021). Nesta região estratégica, motivados pelos preços elevados da soja no mercado internacional, os produtores estão cultivando soja já no primeiro ano após a conversão do Cerrado nativo em áreas agrícolas. Entretanto, o desempenho produtivo da soja no ano inicial de cultivo é reduzido, devido à baixa população de bactérias fixadoras de nitrogênio, baixas concentrações de nutrientes solo e acidez não totalmente corrigida, em função da reação ainda incompleta do calcário (CaCO_3), impedindo o bom desenvolvimento das plantas (Lustosa Filho *et al.*, 2021). Isto ocorre porque na região há predominância de Latossolos, Argissolos e Plintossolos, que são solos de textura arenosa e média/arenosa com baixo poder tampão devido, notadamente, aos baixos teores da fração argila e de matéria orgânica desses solos e, consequentemente, apresentam baixa capacidade de retenção de nutrientes, além de possuírem média a elevada acidez (Lumbreras *et al.*, 2015; Donagemma *et al.*, 2016).

A produtividade das culturas é fortemente limitada pela acidez do solo. A principal razão para a redução da produtividade em solos ácidos está relacionada à toxicidade causada pelo excesso de hidrogênio (H) e de alumínio (Al), baixa saturação de bases, incluindo os elementos básicos potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis e baixa disponibilidade de fósforo (P) (Moore, 2004; Bonfim-Silva *et al.*, 2014). Apesar dessas limitações, o uso de tecnologias

associadas a um manejo intensivo para altas produtividades, tem possibilitado a obtenção de produtividades financeiramente compensatórias no primeiro ano de cultivo (Bohn *et al.*, 2016; Lustosa Filho *et al.*, 2021). Dentre as técnicas para obtenção de elevadas produtividades da soja no primeiro ano após conversão da vegetação de Cerrado para novas áreas agrícolas, destacam-se: (i) o uso de elevadas doses de calcário, podendo ultrapassar valores de 10 a 11 t ha⁻¹ (Donagemma *et al.*, 2016), valores estes que extrapolam conceitos técnicos e recomendações contidas nos boletins de correção e adubação do solo empregados na região (Sousa; Lobato, 2004); (ii) e o uso de gesso agrícola (CaSO₄.2H₂O) para melhorar a fertilidade em maior profundidade do perfil do solo.

No solo, o calcário se dissolve quando incorporado ao solo e entra em contato com a água, ocasião em que o carbonato é dissociado. Os produtos desse processo reagem com os coloides do solo, elevando o pH, os teores de Ca e Mg e a saturação por bases, diminuindo o Al e manganês (Mn) trocáveis e reduzindo a fixação de fósforo (P), elevando com isso sua disponibilidade para as plantas (Nduwumuremyi, 2013; Li *et al.*, 2019). No entanto, um aspecto importante para obtenção de elevadas produtividades da soja se baseia na época mais indicada para a sua semeadura na região, o que inclui a prevenção a atrasos nas operações de abertura da área e preparo de solo, que podem levar a atraso do plantio (Lustosa Filho *et al.*, 2021). Geralmente, a remoção da vegetação nativa de Cerrado e o preparo do solo, incluindo a aplicação de calcário, são feitos durante a época seca do ano. No entanto, a reação do calcário efetivamente se inicia com o começo do período das chuvas, coincidindo com o período recomendado de plantio da soja para maior potencial produtivo. Como consequência, não há tempo suficiente para reação completa do calcário, antes do estabelecimento da cultura.

O tempo insuficiente para reação completa do calcário tem sido utilizado como justificativa para o uso de doses elevadas em áreas de abertura, quando o objetivo é preparar o solo para cultivos mais exigentes (Donagemma *et al.*, 2016). Entretanto, a aplicação de doses deste corretivo acima daquelas recomendadas, pode desequilibrar a solução do solo, uma vez que teores excessivamente elevados de Ca e Mg geram inibição competitiva entre nutrientes, principalmente o potássio (K). O excesso de Ca também pode causar problemas ligados à absorção de Mg, uma vez que o Ca compete com este nutriente por sítios de adsorção (Salvador; Carvalho; Lucchesi, 2011, Carneiro *et al.*, 2018).

Adicionalmente, a baixa solubilidade do calcário também pode caracterizar um fator limitante, sobretudo em áreas de abertura onde não houve construção da fertilidade do solo de Cerrado, que é naturalmente pobre em nutrientes. Portanto, o uso de gesso agrícola é fortemente recomendado devido à sua solubilidade e mobilidade no perfil do solo (Ritchey *et al.*, 1980). O

gesso agrícola promove o deslocamento de bases trocáveis para camadas subsuperficiais, por meio da indução da formação de pares iônicos (Pavan, 1986), dessa forma, neutralizando o Al tóxico em camadas mais profundas (Müller *et al.*, 2020). Além disso, o gesso reduz a saturação de Al em camadas mais profundas por meio do acréscimo das concentrações de Ca (Pauletti; Motta, 2019). Como consequência, o efeito do gesso é observado sobretudo em períodos de “veranico”, uma vez que estimula o desenvolvimento da raiz explorando maior volume de solo e proporciona resiliência das plantas em períodos de estresse abiótico (Xiong *et al.*, 2021). Dessa forma, o uso do gesso agrícola assume papel relevante em regiões de fronteira agrícola como o Matopiba, onde a baixa disponibilidade de nutrientes dos solos e períodos recorrentes de estresse hídrico representam condições edafoclimáticas inerentes (Evangelista; Silva; Simon, 2017).

A fronteira agrícola do Cerrado do Matopiba, sobretudo nos estados do Nordeste (Piauí, Maranhão e Bahia), é marcada pela curta duração do período chuvoso. Para esta região, pouco se sabe acerca do efeito da aplicação de doses elevadas de calcário, sobre as transformações químicas no solo e suas implicações para o balanço de nutrientes e produtividade da soja. No entanto, o uso dessa prática é uma realidade junto aos produtores da região, o que justifica a necessidade de realização de pesquisas.

Diante desse cenário, no presente estudo, foram testadas as seguintes hipóteses: (i) o uso de doses elevadas de calcário é capaz de corrigir suficientemente a acidez do solo, elevar a capacidade de troca de cátions e os teores de Ca e Mg para níveis adequados, mesmo em condições de pouco tempo para reação, em áreas de abertura para cultivo de soja de primeira safra no Matopiba; (ii) o uso combinado do gesso com calcário em áreas de abertura para cultivo de soja de primeira safra pode acelerar a correção da toxicidade de Al do solo e minimizar a necessidade de uso de elevadas doses de calcário. Para tanto, objetivou-se com o presente estudo avaliar os efeitos da aplicação de elevadas doses de calcário e gesso em áreas de conversão recente da vegetação nativa de Cerrado para agricultura, na fertilidade do solo, no estado nutricional e desenvolvimento das plantas, e na produtividade da soja no Cerrado do Matopiba.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura da Soja

A soja [*Glycine max* (L) Merrill] é uma das commodities mais significativas no cenário agrícola mundial, sendo seus grãos essenciais para a produção de farelo e óleo vegetal. Atualmente, é cultivada em aproximadamente 6% das terras aráveis do planeta. Desde a década de 1970, a área destinada ao cultivo da soja apresentou o maior crescimento percentual em comparação com qualquer outra cultura de grande importância. Devido ao seu elevado valor nutricional, especialmente por ser rica em proteínas, A soja se sobressai como uma planta de grande importância econômica. Sua versatilidade e ampla utilização na alimentação humana, produção de rações animais e na indústria de óleos vegetais impulsionam sua demanda global, consolidando-a como uma das principais commodities agrícolas (Hussain *et al.*, 2017; Sobko *et al.*, 2020; Valdes; Gillespie; Dohlman, 2023)

Na agricultura brasileira a soja tem grande importância, respondendo por 49,52% da produção de grãos no país (CONAB, 2024). No ano agrícola 2022/2023, a produção de grãos de soja no Brasil foi de aproximadamente 153,6 milhões de toneladas, a partir de uma área cultivada de 43,5 milhões de hectares (CONAB, 2023). Esta produção representou em torno de 41% da produção mundial de soja (Valdes; Gillespie; Dohlman, 2023).

A expansão da soja no Cerrado tem se avançado principalmente na região do Matopiba (Silva *et al.*, 2019), abrangendo 337 municípios e área de 73 milhões de hectares (Lima *et al.*, 2019). Essa região se destaca pelo plantio de cerca de 5,13 milhões de hectares de soja, representando aproximadamente 12,5% da produção total do país (CONAB, 2024). Considerada estratégica para o crescimento econômico do Brasil, o Matopiba tem atraído agricultores de diversas regiões, impulsionados pela combinação de terras mais baratas e uma topografia adequada à mecanização agrícola (Pires *et al.*, 2016; Lustosa Filho *et al.*, 2021). Nesta região estratégica, motivados pelos preços elevados da soja no mercado internacional, os produtores estão cultivando soja já no primeiro ano após a conversão do Cerrado nativo em áreas agrícolas.

Entretanto, a produtividade da soja no primeiro ano de cultivo é baixa, devido à baixa população de bactérias fixadoras de nitrogênio, baixas concentrações de nutrientes solo e acidez

não totalmente corrigida, em função da reação ainda incompleta do calcário, impedindo o bom desenvolvimento das plantas (Lustosa Filho *et al.*, 2021).

2.2 Solos ácidos

A produção de biomassa e o rendimento das culturas são limitados em solos fortemente ácidos devido aos níveis tóxicos de alumínio e manganês e ao esgotamento de cátions básicos, como cálcio, magnésio e potássio (Nair *et al.*, 2019). Esses fatores combinados podem levar a uma redução significativa na produtividade das culturas, afetando a segurança alimentar e a sustentabilidade da agricultura (Wang *et al.*, 2021)

Cerca de metade das áreas cultiváveis do planeta são ácidas, e essa área tem aumentado nos últimos anos (Wang *et al.*, 2021). Nos solos tropicais, 1/3 apresenta alta acidez, com elevada saturação por alumínio e $\text{pH} < 5$ e cerca de 70% das áreas analisadas pela Embrapa são ácidas, necessitando de correção para aumentar a saturação por bases acima de 60%. A acidez, junto à pobreza de nutrientes, atrasou a inclusão de grandes áreas do Cerrado a produção agrícola, que só foi possível com práticas de calagem e adubação.

A formação de solos ácidos é um processo complexo, resultante de diversas reações químicas e bioquímicas influenciado por diversos fatores, como a lixiviação de cátions básicos, como cálcio e magnésio, provocada por chuvas intensas e escoamento superficial principalmente em regiões tropicais, onde a elevada precipitação promove a remoção de nutrientes essenciais, comprometendo também a fertilidade do solo (Caires; Joris; Churka, 2011). A acidez do solo está igualmente associada à presença de alumínio trocável, que é tóxico para muitas plantas onde em solos ácidos, a alta saturação de alumínio pode impactar negativamente o desenvolvimento das raízes e comprometer a absorção de nutrientes, afetando o desenvolvimento vegetal (Zheng, 2010). A decomposição de materiais orgânicos e sua mineralização também podem influenciar a acidez do solo, liberando ácidos orgânicos que aumentam a acidez (Devi *et al.*, 2023).

a aplicação de fertilizantes, a presença de compostos ácidos na atmosfera, influência de materiais de origem ácida (Chen; Xiao; Chen, 2023, Devi *et al.*, 2023)

A acidez do solo pode ser qualificada em acidez ativa e acidez potencial. A acidez ativa diz respeito à porção do hidrogênio que se encontra dissociada como H^+ na solução do solo, medindo-se por meio do pH. Já a acidez potencial está associada ao hidrogênio e ao alumínio

que permanecem na fase sólida, na forma não dissociada, e se divide em duas categorias: acidez trocável e acidez não trocável. A acidez trocável refere-se ao alumínio que está eletricamente ligado à superfície dos coloides, enquanto a acidez não trocável diz respeito ao hidrogênio que está associado aos coloides de forma não trocável, dissociando-se apenas quando há um aumento no pH do ambiente.

A aplicação de calcário reduz a toxicidade de Al e Mn, melhora o pH, Ca e Mg, e aumenta a absorção de P no solo e nas plantas, sendo uma opção sustentável para restaurar a saúde e a fertilidade do solo (Athanasie *et al.*, 2013). Dessa forma, a correção da acidez do solo por meio de calagem é a melhor estratégia para melhorar a eficiência e produtividade de solos ácidos (Devi *et al.*, 2023).

2.3 Solos do Cerrado

O Cerrado apresenta uma variedade de formas de vegetação em um padrão diversificado, resultado da diversidade de solos, topografia e climas presentes nessa vasta região (Elias *et al.*, 2019). Predominam nesse bioma os Latossolos, Argissolos e Plintossolos, que são solos de textura arenosa a média/arenosa, com baixo poder tampão devido aos níveis reduzidos de matéria orgânica e argila. Como consequência, esses solos apresentam baixa capacidade de retenção de nutrientes e, acidez média a elevada (Lumbreras *et al.*, 2015; Donagemma *et al.*, 2016). Esses atributos influenciam de maneira integrada o crescimento radicular, a infiltração e o fluxo de água no solo, as trocas gasosas, a atividade biológica e a mineralização do carbono, impactando diretamente a produtividade agrícola (Carvalho *et al.*, 2008).

A textura predominantemente arenosa desses solos favorece a drenagem e aeração, porém retém menos água e nutrientes, o que pode comprometer a fertilidade. Essa textura afeta diretamente a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, influenciando a produtividade agrícola (Donagemma *et al.*, 2016). Além disso, os solos do Cerrado se destacam por sua grande profundidade e elevada porosidade, o que proporciona uma excelente infiltração de água. No entanto, apesar dessa capacidade de infiltração, a retenção de água é limitada, e, somada à irregularidade pluviométrica, especialmente durante veranicos, ocorre uma redução da umidade do solo, mesmo na estação chuvosa.

Os principais minerais da fração argila encontrados nesses solos incluem goethita e gibbsita, que também influenciam diretamente na porosidade total, frequentemente superior a

0,55 m³ m⁻³, conferindo ao solo uma alta capacidade de drenagem (Pragana *et al.*, 2016). Quando essa particularidade é combinada com o clima regional, marcado pela concentração de precipitação entre novembro e março, ocorre um intenso fluxo de água que percola o perfil do solo (Lima *et al.*, 2020).

Do ponto de vista químico, os solos do Cerrado apresentam baixa capacidade de retenção de cátions e elevada acidez, devido à presença de íons de hidrogênio e alumínio tóxicos, além de uma escassa disponibilidade de fósforo (P) e baixa saturação de bases, tornando desafiadora a construção da fertilidade e a obtenção de altas produtividades agrícolas (Moore, 2004; Bonfim-Silva *et al.*, 2014; Donagemma *et al.*, 2016).

Apesar dessas limitações, o uso de tecnologias avançadas e manejo intensivo tem permitido a obtenção de produtividades financeiramente viáveis já no primeiro ano de cultivo (Bohn *et al.*, 2016; Lustosa Filho *et al.*, 2021). Entre as técnicas aplicadas para maximizar a produtividade da soja em áreas recém-convertidas do Cerrado para uso agrícola, destacam-se: (i) o uso de doses elevadas de calcário, que podem ultrapassar 10 a 11 t ha⁻¹ (Donagemma *et al.*, 2016). Valores que excedem as recomendações técnicas dos boletins de correção e adubação de solos da região (Sousa; Lobato, 2004) (ii) e o uso de gesso agrícola (CaSO₄.2H₂O) para melhorar a fertilidade em maior profundidade do perfil do solo.

2.4 Calagem

As principais rochas carbonáticas, utilizadas para a correção do solo são calcários e dolomitos. São rochas sedimentares formadas principalmente por calcita (CaCO₃), enquanto os dolomitos são constituídos fundamentalmente pelo mineral dolomita (CaCO₃.MgCO₃). Compreender a composição do calcário, incluindo os teores de óxidos e o poder de neutralização (PN), é fundamental para aprimorar as orientações de aplicação de corretivos da acidez do solo. A quantidade de carbonato é o principal indicador da qualidade do calcário, pois sua reação no solo libera íon carbonato, este ânion CO₃²⁻ (base forte) realiza a hidrólise da água com formação do íon OH⁻, que irá neutralizar a acidez ativa (H⁺) do solo (Li *et al.*, 2019; Bortoluzzi *et al.*, 2022).

À medida que a acidez ativa do solo é elevada, o Al³⁺ é hidrolisado a Al(OH)³, que possui carga zero, essa forma química do alumínio tende a precipitar. Já a parte catiônica do

calcário desloca H^+ e Al^{3+} dos sítios de trocas para a solução do solo (Novais; Barros; Alvarez, 2007).

Soratto e Crusciol (2008) afirmam que a velocidade de reação do calcário no solo está diretamente relacionada com o regime pluviométrico da região, uma vez que o calcário precisa ser dissolvido e os produtos dessa dissolução reagem com os componentes de acidez do solo. Em um estudo realizado em solo argiloso sob cultivo de soja, Caires *et al.* (1998) investigaram o efeito da aplicação de calcário no pH do solo ao longo do tempo. Os autores observaram que a aplicação de 6 t ha^{-1} de calcário elevou o pH do solo em $CaCl_2$ para 5,8 após 12 meses; 28 meses após a aplicação, o pH já estava em 6,5. Caires, Joris e Churka (2011), estudando o efeito de longo prazo da adição de calcário e gesso na produtividade do plantio direto de milho e soja e nas propriedades químicas do solo no sul do Brasil observou que o movimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis da camada superficial do solo para o subsolo foi evidente ao longo do tempo. Esses resultados demonstram que a dissolução do calcário é um processo gradual que depende da precipitação pluviométrica.

Em um estudo realizado em um Latossolo Amarelo no Cerrado piauiense, Schenfert *et al.* (2019) investigaram o efeito de doses crescentes de calcário no pH do solo após dois anos de aplicação e precipitação acumulada de 2000 mm. Os autores observaram que o pH do solo aumentou em resposta às doses até chegar em 8 t ha^{-1} . Doses maiores que 8 t ha^{-1} não resultaram em maior redução da acidez ativa, pois o calcário não teve tempo e água suficiente para ser dissolvido e reagir no solo.

A calagem se destaca como uma prática crucial para a agricultura, indo além da correção da acidez do solo, pois uma vez corrigido o pH ocorre modificações na dinâmica de outros nutrientes no solo como o aumento da disponibilidade de P pela redução da adsorção a óxidos de Fe^{2+} e Al^{3+} , aumento da disponibilidade de nitrogênio pela maior mineralização da matéria orgânica, assim como maior eficiência na fixação de nitrogênio pelas bactérias. Ocorre também aumento da disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ pelo aumento da CTC em função as cargas dependentes de pH (Penn; Camberato, 2019). Para Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} e Mn^{2+} a aplicação de calcário leva a uma redução nos teores desses micronutrientes (Novais; Barros; Alvarez, 2007; Oliveira Junior *et al.*, 2020).

Após a aplicação de calcário, as reações químicas que ocorrem no solo podem beneficiar a nutrição da soja com aumento nos teores de foliares de N e P_2O_5 entretanto, níveis de H_3BO_3 , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} e Zn^{2+} podem ser reduzidos (Sávio *et al.*, 2011). Fageria (2001), pesquisando altas doses de calcário (0,4,8,12,16 e 20 t ha^{-1}) sobre um Latossolo Vermelho distrófico com pH em H_2O de 5,3 teores de Ca^{2+} de $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e Mg de $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada 0-0,20

m, não observou resposta da soja em produtividade. Da mesma forma, Besen *et al.* (2021) ao aplicar 0,0, 1,5, 2,9 e 5,5 t ha⁻¹ de calcário em um Latossolo Vermelho distrófico com pH em CaCl₂ inicial de 5,25 e V% de 50% também não observou efeito significativo. Por outro lado, Schenfert *et al.* (2019) aplicando 0, 2, 4, 6 8 e 10 t ha⁻¹ em um Latossolo Amarelo distrófico, com pH CaCl₂ 3,7 com saturação por base de 6%, obteve resposta exponencial da produtividade da soja. Bossolani *et al.* (2021) aplicando 0, 3,23; 6,5 e 13 t ha⁻¹, correspondendo a 0, 50%, 100% e 200% da dose recomendada para um latossolo com pH em CaCl₂ de 4,2 e V% de 35%, obtiveram resposta significativa, com maior produtividade quando aplicado 200% da dose recomendada.

O tempo insuficiente para reação completa do calcário tem sido utilizado como justificativa para o uso de doses elevadas em áreas de abertura, quando o objetivo é preparar o solo para culturas mais exigentes (Donagemma *et al.*, 2016). Entretanto, a aplicação de doses deste corretivo acima daquelas recomendadas, pode desequilibrar a solução do solo, uma vez que teores excessivamente elevados de Ca e Mg geram inibição competitiva entre nutrientes, principalmente o K. O excesso de Ca também pode causar problemas ligados à absorção de Mg, uma vez que o Ca compete com este nutriente por sítios de adsorção (Salvador; Carvalho; Lucchesi, 2011; Carneiro *et al.*, 2018).

Adicionalmente, a baixa solubilidade do calcário também pode caracterizar um fator limitante, sobretudo em áreas de abertura onde não houve construção da fertilidade do solo de Cerrado, que é naturalmente pobre em nutrientes. Portanto, o uso de gesso agrícola é fortemente recomendado devido à sua solubilidade e mobilidade no perfil do solo (Ritchey *et al.*, 1980).

2.5 Gessagem

O gesso agrícola é um resíduo gerado durante o processo de produção do ácido fosfórico (H₃PO₄) e sulfato de cálcio diidratado (CaSO₄.2H₂O). As indústrias de fertilizantes utilizam como matéria-prima, rochas fosfatadas que, ao serem tratadas com ácido sulfúrico e água, produzem ácido fosfórico, sulfato de cálcio di-hidratado e ácido fluorídrico (Besen *et al.*, 2021). O gesso agrícola possui 15% de enxofre (S) e 18% de cálcio (Ca).

Quando aplicado na camada superficial do solo, o gesso agrícola dissocia-se nas formas dos íons Ca²⁺ e SO²⁻, que participarão da troca iônica, funcionando como fonte respectivamente de cálcio e de enxofre, enquanto a outra parte, o CaSO⁰, é móvel no perfil do solo, contribuindo

para o movimento de pares iônicos (CaSO^0 , MgSO^0 , KSO^-) em direção ao subsolo (Zandoná *et al.*, 2015; Schmidt; Tomelero; Bona, 2016). Dessa forma, o gesso agrícola promove o deslocamento de bases trocáveis para camadas subsuperficiais, reduzindo a toxicidade de Al, por meio da indução da formação de pares iônicos, neutralizando o Al tóxico em camadas mais profundas (Müller *et al.*, 2020).

De forma resumida, as interações do gesso agrícola no subsolo, que favorecem o ambiente das raízes, incluem a dissociação do CaSO_4 que é carregado para as camadas mais profundas, a troca de íons onde o Ca^{2+} do gesso substitui o Al^{3+} adsorvido nas partículas de argila, a complexação do Al^{3+} com o SO_4^{2-} , e a geração do íon par AlSO_4^+ , que é inofensivo para as plantas. (Schmidt; Tomelero; Bona, 2016).

Segundo Sousa e Lobato (2004), quando as propriedades químicas do solo apresentarem $\text{Ca} < 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^3$, $\text{Al} > 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^3$, saturação por alumínio $> 20\%$ e $\text{V}\% < 35$, a aplicação de gesso resultará em alta probabilidade de resposta das culturas devido ao aumento do Ca^{2+} em profundidade e a neutralização do Al^{3+} no perfil do solo, o que favorece o aprofundamento das raízes. Dessa forma, as plantas conseguem superar períodos de seca ao explorar um volume maior de solo, utilizando de forma mais eficiente a água e os nutrientes disponíveis (Novais; Barros; Alvarez, 2007). Porém, doses elevadas de gesso podem deslocar o magnésio e potássio para camadas mais profundas induzindo deficiências desses nutrientes na planta e redução da produtividade (Caires *et al.*, 1998),

A ação do gesso é particularmente visível durante os períodos de "veranico", já que favorece a ampliação da área do solo que as raízes conseguem acessar e oferece maior resistência das plantas em momentos de estresse ambiental (Xiong *et al.*, 2021). Nesse contexto, a utilização de gesso agrícola desempenha uma função importante em áreas de expansão agrícola, como o Matopiba. A fertilidade natural dos solos é baixa e requer correção, e a ocorrência frequente de estresse hídrico cria condições edafoclimáticas que são características da região (Evangelista; Silva; Simon, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda União, no município de Currais, Piauí, Brasil ($8^{\circ}39'25.88''\text{S}$; $44^{\circ}39'47.20''\text{W}$; 540 m altitude). A região é dominada pelo bioma Cerrado (Figura 1).

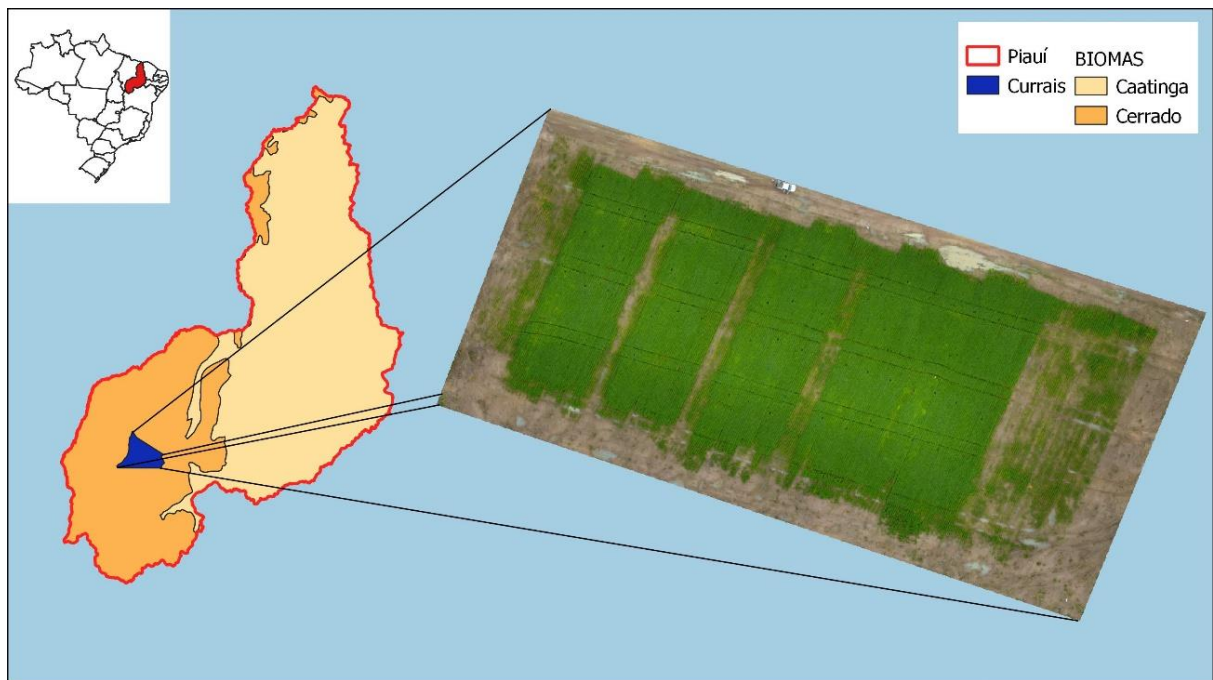


Figura 1 - Mapa de localização do município e do local do experimento, Fazenda União, Currais, Piauí, Brasil.

O clima é do tipo Aw segundo classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), marcado por períodos de inverno seco entre maio e setembro, e verões chuvosos de outubro a abril. Na figura 2 é apresentada a pluviosidade média obtida em pluviômetro instalado próximo à área experimental.

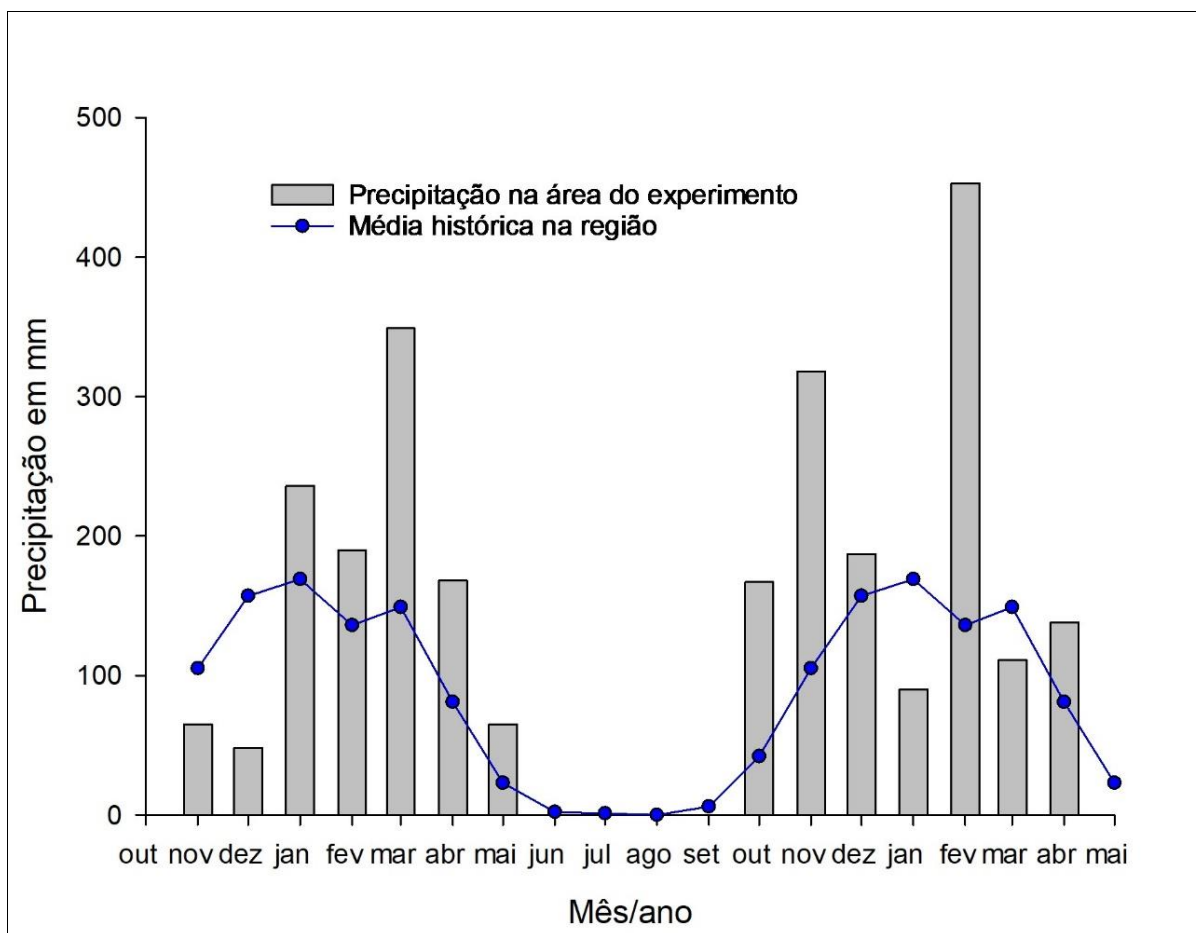


Figura 2 - Precipitação média mensal obtida a partir de pluviômetros na área do experimento, no período de novembro de 2019 a abril de 2021, e médias históricas a partir de uma série de dados de 30 anos em Currais, Piauí, Brasil.

A área utilizada para a experimentação era dominada por vegetação de Cerrado *stricto sensu* (Furley, 1999). Após remoção da vegetação nativa e antes da instalação do ensaio, foram coletadas amostras estratificadas nas profundidades 0,0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Após a coleta, o solo foi exposto ao ar para secar e, em seguida, passou por uma peneiração em uma malha de 2 mm a fim de preparar as amostras para as análises posteriores. As características químicas do solo que foram avaliadas incluíram: pH em CaCl_2 (1:2,5 solo-solução) e em água; carbono orgânico total (COT) por digestão úmida com dicromato de potássio; K, P, Cu, Fe, Mn, Zn e Na extraídos com Melich-1 (H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1} e HCl 0,050 mol L^{-1}). As concentrações de K e Na foram determinadas por fotômetro de chama, de P por colorimetria; Ca, Mg e Al foram extraídos com cloreto de potássio (1 mol L^{-1}) e determinados por absorção atômica, juntamente com Cu, Fe, Mn e Zn; o Al^{3+} foi determinado por titulação; a acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$) foi extraída com solução de acetato de cálcio (0,5 mol L^{-1}) e determinada por titulação; O enxofre foi determinado com base na extração de sulfato por uma solução de fosfato de cálcio,

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol L⁻¹, dissolvidos em ácido acético 2,0 mol L⁻¹, e quantificação por turbidimetria provocada pela presença de BaSO₄, formado pela reação do S-SO₄ extraído das amostras de solo com BaCl₂.2H₂O (Raij *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2017) e granulometria pelo método da pipeta (Tabela 1).

Para determinar a capacidade tampão do solo foi utilizado o método da incubação. Para isso foram adicionadas quantidades crescentes de calcário equivalentes às doses de 0, 3, 6 e 9 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (33% CaO, 17% MgO), com poder de neutralização ou Equivalente $\text{CaCO}_3 = 101,23\%$ e granulometria < 0,3 mm). Foram utilizadas quatro repetições para cada dose de calcário, totalizando 16 amostras de solo. Cada amostra consistiu em 500 g de solo armazenados em copos plásticos e mantidos com umidade correspondente a 80% da capacidade de retenção de água, fechados e incubados por 90 dias. Após esse período foram determinados os valores de pH em água, na relação solo: solução 1:2,5 e determinada a relação pH em água x quantidade de CaCO_3 , através de uma equação linear $y = 4,25 + 0,32^{**}x$ $R^2 = 0,94$. A capacidade tampão do solo expressa como a recíproca da inclinação da curva foi igual a 3,12 t ha⁻¹ (0-0,2 m) de calcário por unidade de pH, no intervalo de pH 4-7 no solo do estudo (Liu *et al.*, 2005).

Tabela 1 - Atributos químicos e granulométricos determinados antes da instalação da área experimental nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em área de Cerrado.

Camadas	pH CaCl ₂	pH H ₂ O	COT	N	C/N	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	CTC	V	m
m	-- g kg ⁻¹ -			mg kg ⁻¹			----- cmol _c kg ⁻¹ -----			----- % -----					
0-0,2	3,76	4,45	7,94	0,45	17,6	1,56	0,02	0,41	0,12	0,96	3,37	0,55	3,92	13,8	64,1
0,2-0,4	3,89	4,48	5,16	0,39	13,2	0,65	0,00	0,01	0,00	0,56	2,05	0,01	2,07	0,3	98,8
0,4-0,6	3,98	4,55	4,17	0,42	9,9	0,62	0,00	0,01	0,02	0,47	1,50	0,03	1,53	1,6	95,2
				B	Cu	Fe	Mn	Zn	S-SO ₄ ²⁻	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Argila	Silte	
				----- mg kg ⁻¹ -----					----- % -----						
0-0,2				0,18	0,01	66,41	0,02	0,31	0,79	44,2	39,4	83,6	15,5	0,9	
0,2-0,4				0,15	0,01	59,67	0,18	0,16	1,24	41,9	39,5	81,4	17,1	1,5	
0,4-0,6				0,15	0,02	34,35	0,01	0,46	2,29	39,7	36,2	75,9	22,3	1,8	

Note: pH CaCl₂ (Potencial de hidrogênio em cloreto de cálcio), pH H₂O (Potencial de hidrogênio em água), COT (Carbono Orgânico Total), N (Nitrogênio), C/N (Relação Carbono Nitrogênio), P (Fósforo), K (potássio), Mg (magnésio), Al (Alumínio), H + Al (Hidrogênio + alumínio), SB (Soma de Bases), V (Saturação de base), m (Saturação por alumínio), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês), Zn (Zinco).

3.2 Delineamento experimental, tratamentos e manejo

O experimento foi conduzido no delineamento experimental em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Foram testadas cinco doses de calcário e quatro doses de gesso, em parcelas com dimensões de $13,2 \times 6,6$ m (Figura 3).

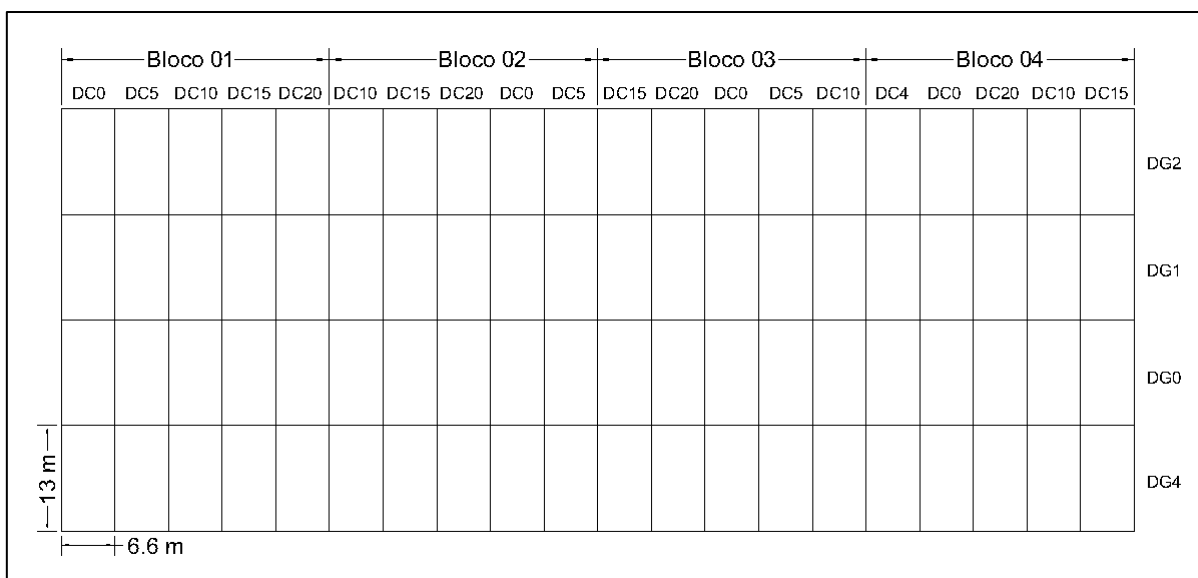


Figura 3 - Croqui do experimento: DC0, DC5, DC10, DC15 e DC20 correspondem a aplicação de 0, 5, 10, 15 e 20 t ha⁻¹ de calcário, respectivamente; DG0, DG1, DG2 e DG4 correspondem, respectivamente, a aplicação de gesso nas doses 0, 1, 2 e 4 t ha⁻¹.

Os tratamentos consistiram das seguintes doses de calcário: 0, 5, 10, 15 e 20 t ha⁻¹, e de gesso: 0, 1, 2 e 4 t ha⁻¹. As doses de 5 t ha⁻¹ de calcário e 1 t ha⁻¹ de gesso corresponderam às respectivas doses padrão recomendadas com base na análise de solo. Para a determinação da dose padrão, empregou-se o método da neutralização do Al e elevação de Ca⁺Mg, conforme (Sousa; Lobato, 2004). O calcário empregado apresentou as seguintes características: 25,9% de CaO, 18,7% de MgO e PRNT de 77,6%. O gesso agrícola utilizado é proveniente de gipsita moída, com 15% de S e 18% Ca.

Após remoção da vegetação nativa de Cerrado, foi realizada gradagem com grade de 36", com posterior catação de raízes, seguido por uma nova gradagem com grade de 36". Após a realização dessas operações, o calcário foi aplicado a lanço na área total de cada parcela e incorporado com grade de 36" na profundidade de 0,3 m, seguida de uma gradagem niveladora (07/11/2019). Posteriormente a esta operação, foi aplicado o gesso a lanço nas parcelas, o qual foi incorporado com grade de 28", seguido de gradagem niveladora (08/11/2019). Em 02/12/2019 foi realizada a aplicação de 880 kg ha⁻¹ de superfosfato simples (18% P₂O₅, 15%

de Ca e 8% de S) a lanço, e posteriormente incorporado, em todas as parcelas. Em 30/12/2019 foi realizado o plantio da soja (ano agrícola 2019/2020), utilizando a cultivar BRS9180, no espaçamento de 0,5 m entre linhas e 12,5 sementes por metro linear. Por ocasião do plantio, foram também aplicados 110 kg ha⁻¹ de MAP (50% de P₂O₅ e 10% de N). Aos 28 dias após a semeadura (28/01/2020), foi realizada adubação de cobertura com 170 kg ha⁻¹ de KCl (62% K₂O). No ano agrícola 2020/2021, o plantio foi realizado em 18/12/2020, com a mesma cultivar de soja e mesmo estande. A adubação de plantio foi realizada com 200 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP), aplicação 50 kg ha⁻¹ a lanço de de sulfurgran® (78% S e 3% de B) imediatamente antes do plantio. Além disso, 30 dias após o plantio, foram aplicados 160 kg ha⁻¹ de KCl.

Nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021, as sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, utilizando-se três doses do inoculante. Nesse momento, foi também aplicado Cu, Mo e Zn às sementes. Ao longo do ciclo de desenvolvimento, as plantas receberam também a aplicação foliar de Mn e B no estágio V4 (terceira folha trifoliada completamente expandida), de Cu no estágio V6 (quinta folha trifoliada completamente expandida) e de Mn, Cu e B no estágio R1 (início do florescimento).

3.3 Atributos analisados

Em cada parcela, foram realizadas coletas de amostras de solo para a análise das propriedades químicas. As amostras compostas foram obtidas a partir da obtenção de quatro amostras, sempre após a colheita da soja, nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021 e coletadas nas camadas de 0,0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Após coletado, o solo foi seco ao ar e peneirado em peneira de malha de 2 mm para a realização das análises posteriores. Os atributos químicos do solo mensurados foram: pH em CaCl₂ (1:2,5 solo-solução) e em água; Carbono orgânico (CO) por digestão úmida com dicromato de potássio; K, P, Cu, Fe, Mn, Zn e Na extraídos com Melich-1 (H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ e HCl 0,050 mol L⁻¹). As concentrações de K e Na foram determinadas por fotômetro de chama, de P por colorimetria; Ca, Mg e Al foram extraídos com cloreto de potássio (1 mol L⁻¹) e determinados por absorção atômica, juntamente com Cu, Fe, Mn e Zn; o Al³⁺ foi determinado por titulação; a acidez potencial (H+Al) foi extraída com solução de acetado de cálcio (0,5 mol L⁻¹) e determinada por titulação; o enxofre foi

determinado por meio da turbidez formada pelo sulfato, utilizando cloreto de bário (Raij *et al.*, 2001, Teixeira *et al.*, 2017)

Especificamente para as amostras na profundidade de 0,0-0,2 m, determinaram-se também as concentrações de Ca e Mg não-trocáveis do solo, que representam as frações dos corretivos ainda não reagidas. Essas avaliações foram conduzidas com base na abordagem apresentada por (Raij *et al.*, 1982, Quaggio; Gallo; Mascarenhas, 1995, Soratto; Crusciol, 2008). Em um tubo percolador, foram adicionados 5 cm³ de solo sobre papéis filtro, após a percolação de 50 mL da solução de KCl na amostra (primeira extração), uma alíquota de 1 mL do extrato resultante foi misturada com 10 mL de uma solução de lantânio (La) a 0,1%. Em seguida, realizaram-se as medições dos teores de Ca e Mg utilizando espectrofotometria de absorção atômica. Depois da primeira extração, o solo foi colocado em um frasco de erlenmeyer, onde foram adicionados 15 mL de água e 25 mL HCl 0,8 mol L⁻¹. O grupo foi submetido a fervura em uma placa aquecedora por 5 minutos a 200 °C. Assim, com a fervura do solo e a presença do HCl, o corretivo remanescente é induzido a agir, resultando em uma rápida dissolução. Depois do resfriamento, o material passou por uma filtragem (segunda extração); em 1 mL do extrato, adicionaram-se 10 mL de La (0,5%). A análise foi realizada por meio de espectrofotometria, quantificando os níveis de Ca e Mg, correspondentes a estimativas de Ca e Mg não-trocáveis. Os resultados, após a subtração dos valores da amostra controle, que não foi exposta ao calcário e gesso, mostram a parte dos Ca e Mg que ainda não havia interagido com o solo.

Para analisar a condição nutricional da soja, realizou-se a coleta de, nos dois anos agrícolas, folhas novas com pecíolo, que correspondem ao 3º e 4º trifólio a partir do caule principal, durante a fase que vai do início da floração (R1) até o florescimento completo (R2) (Oliveira Junior *et al.*, 2020). Os níveis de macro e micronutrientes nas folhas (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn) foram quantificados de acordo com (Bataglia *et al.*, 1983). Após digestão nítrica e perclórica o P foi determinado por colorimetria, o K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por absorção atômica, o S por turbidimetria, o N pelo método de Kjeldahl e o B por calcinação.

No início do florescimento, foram escolhidas aleatoriamente, 10 plantas por parcela e avaliados os aspectos morfológicos como: medição da altura de plantas realizada com o auxílio de régua graduada, do solo ao meristema apical; diâmetro de caule - com paquímetro digital, a 2 cm do solo. A raiz foi coletada com cuidado utilizando uma pá, garantindo sua remoção por completa do solo, em seguida colocada em uma peneira e lavada. Após a extração, o volume da raiz foi medido pelo deslocamento de água em uma proveta, após a inserção da raiz. Para

avaliar a massa seca da parte aérea e das raízes, as amostras foram colocadas em uma estufa com circulação forçada a 65°C durante 72 horas, e em seguida pesadas com uma balança digital.

As produtividades da soja foram determinadas pela colheita manual de duas linhas de dois metros no centro da parcela, seguida pela padronização da umidade para 13% e conversão da produtividade de grãos para kg ha⁻¹.

3.4 Análise dos dados

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilks, $p < 0,05$), com posterior análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). Quando constatado efeito significativo para o fator calcário, gesso e/ou sua interação, as médias dos dados foram analisadas por meio de teste de regressão, com auxílio do software estatístico SISVAR versão 5.6 (Ferreira, 2019).

4 RESULTADOS

4.1 Fertilidade do solo no primeiro ano de cultivo

No ano agrícola 2019/2020, houve interação significativa entre doses de calcário e de gesso para P, K, m e $S-SO_4^{2-}$ na camada de 0,0-0,2 m. Isoladamente, as doses de calcário resultaram em diferenças significativas para as variáveis pH, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, V%, m%, $S-SO_4^{2-}$, Fe, Mn e Zn. Da mesma forma, as doses de gesso promoveram alterações significativas para Ca, SB, m e $S-SO_4^{2-}$ (Tabela).

As alterações promovidas pelas doses de calcário na camada de 0,0-0,20 permitiram o ajuste de modelos quadráticos para pH (Figura 4 a), Ca (Figura 4 e), Mg (Figura 4 f), H+Al (Figura 4 h), SB (Figura 4 i), V% (Figura b) e Fe (Figura 5a). Para os teores de Al, houve o ajuste de um modelo exponencial decrescente (Figura 4 g). Para o P, foram ajustados modelos quadráticos para as doses de calcário em todas as doses de gesso (Figura 4 b), enquanto para o K apenas na menor dose de gesso (Figura 4 c) e para o $S-SO_4^{2-}$, na maior e menor dose de gesso (Figura e). A interação entre calcário e gesso para a saturação por Al (m) resultou no ajuste de modelos exponenciais em função das doses de calcário, em todas as doses de gesso (Figura c).

Tabela 2 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0-0,2 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado. Currais, Piauí.

Calcário (t ha ⁻¹)	pH	pH	COT	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Na	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	H ₂ O	g kg ⁻¹	- mg kg ⁻¹ -		-----	cmol _c kg ⁻¹	-----				- % -			-----	mg kg ⁻¹	-----			
0	3,63	4,82	10,88	4,77	38,28	0,13	0,05	0,50	3,48	0,27	3,75	8	64,70	0,80	6,17	0,27	0,10	220,31	37,50	1,89
5	4,49	5,83	10,42	14,22	38,28	0,68	0,38	0,20	2,23	1,16	3,39	34	15,50	1,05	8,28	0,23	0,10	153,91	35,16	1,97
10	5,13	6,24	10,42	22,73	44,53	1,02	0,63	0,04	1,62	1,77	3,39	52	2,20	1,59	9,22	0,23	0,10	93,75	24,22	1,93
15	5,36	6,42	10,88	18,05	42,97	1,28	0,71	0,00	1,52	2,11	3,63	58	0,20	1,12	6,95	0,25	0,11	65,63	31,25	1,67
20	5,56	6,14	11,33	8,52	37,50	1,44	0,84	0,00	1,28	2,39	3,67	65	0,00	1,34	7,19	0,25	0,10	39,84	25,00	1,54
Teste F	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	ns	*	ns	ns	**	*	*
Gesso (t ha ⁻¹)																				
0	4,81	5,89	10,88	13,28	41,41	0,81	0,52	0,16	2,05	1,45	3,50	42	17	1,43	5,78	0,24	0,10	121,88	36,72	1,84
1	4,79	5,81	10,88	11,88	44,53	0,88	0,52	0,17	2,09	1,52	3,61	42	22	1,06	6,64	0,26	0,10	119,53	24,22	1,77
2	4,89	5,93	11,33	16,33	35,16	0,91	0,52	0,15	1,99	1,54	3,53	44	16	1,18	8,05	0,22	0,10	110,94	32,81	1,84
4	4,85	5,83	10,88	13,28	41,41	1,02	0,53	0,13	1,98	1,66	3,64	46	12	1,05	9,69	0,25	0,11	106,25	30,47	1,75
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	5,4	5,97	16,3	39,2	17,6	18,8	18,6	34,0	19,1	15,5	10,1	14,4	19,6	55,0	36,4	28,9	9,5	30,4	48,6	22,8

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

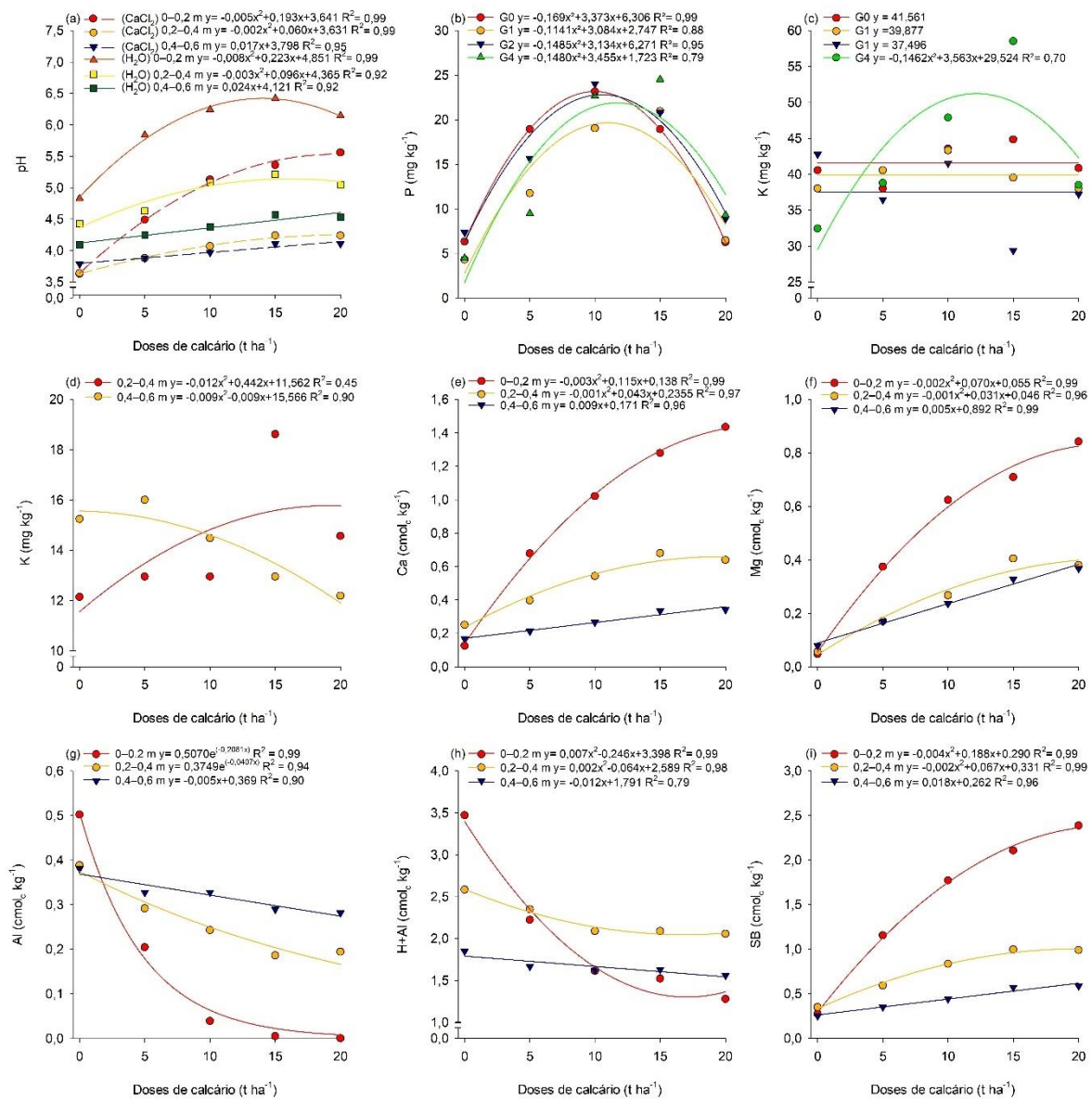


Figura 4 - Valores de pH do solo em função das doses de calcário (a); P (b) e K (c) em função da interação entre as doses de calcário e gesso na profundidade de 0,0–0,20 m; K em função das doses de calcário nas profundidades de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m (d); Ca (e), Mg (f), Al (g), H + Al (h) e SB (i) em função das doses de calcário no ano agrícola de 2019/2020. Currais, Piauí, Brasil.

Para Mn (Figura 5b) e Zn (Figura 5c), foram ajustados modelos lineares decrescentes em função de doses de calcário. A aplicação de calcário nas doses de 20, 10,8, 10,5, 20, 20, 20, 20 e 10,4 t ha⁻¹ resultaram nos maiores valores de pH CaCl₂ (5,55), pH H₂O (6,11), P (21 mg kg⁻¹), K (42,96 mg kg⁻¹), Ca (1,41 cmol_c kg⁻¹), Mg (0,86 cmol_c kg⁻¹), CTC (2,34 cmol_c kg⁻¹), V (63,8%) e S-SO₄²⁻ (8,59 mg kg⁻¹). Por sua vez, as doses de 15, 20, 15, 20, 20 e 20 t ha⁻¹ de calcário resultaram nos menores valores de Al (0,0 cmol_c kg⁻¹), H + Al (1,4 cmol_c kg⁻¹), m% (0,0 cmol_c kg⁻¹), Fe (41,41 mg kg⁻¹), Mn (24,84 mg kg⁻¹) e Zn (1,61 mg kg⁻¹).

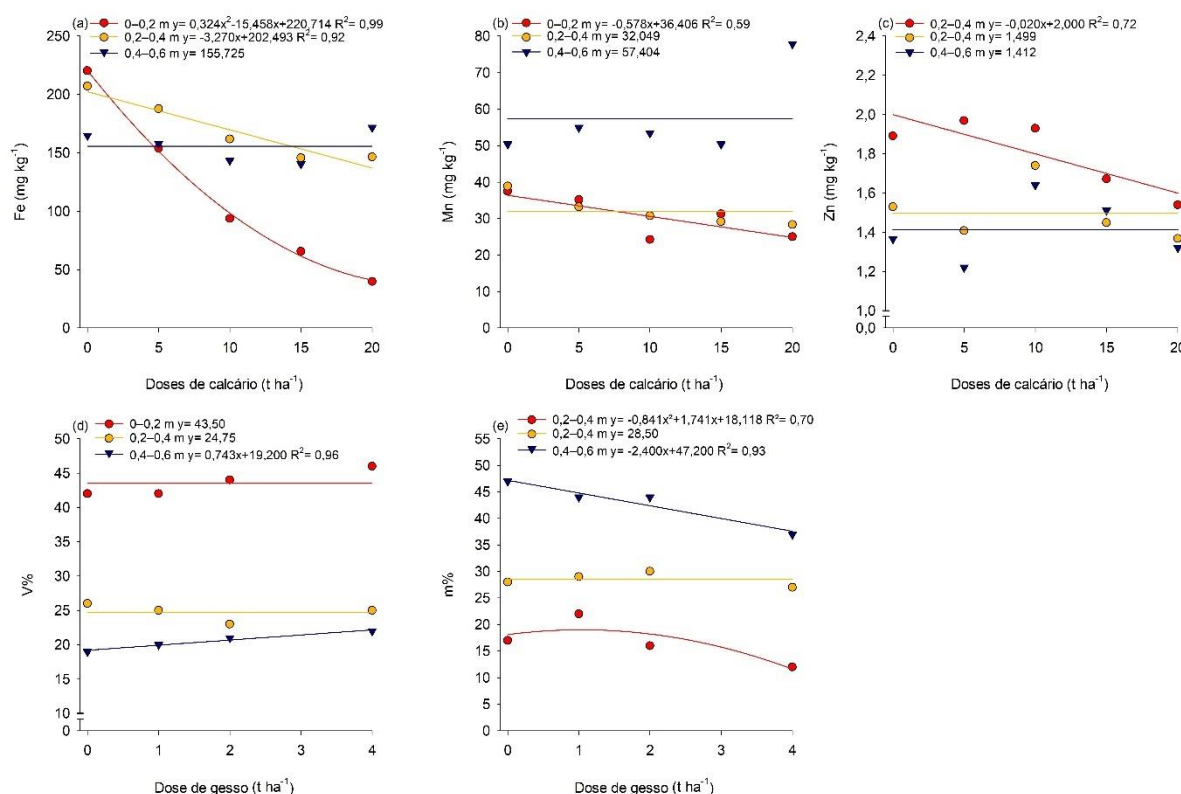


Figura 5 - Dados referentes a Fe (a), Mn (b) e Zn (c) em função das doses de calcário, e V (d) e m% (e) em função das doses de gesso na safra 2019/2020. Currais, Piauí, Brasil.

A maior dose de gesso (4 t ha^{-1}) proporcionou maiores concentrações de Ca ($1,01 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), SB ($1,66 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e S-SO_4^{2-} ($5,75 \text{ mg kg}^{-1}$) e a menor concentração de Al ($0,28 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Independente da dose de gesso aplicada, as doses de calcário que proporcionaram máxima concentração de P variaram de 10 e $11,7 \text{ t ha}^{-1}$, com valores de 22,34, 18,98, 22,03 e $21,08 \text{ mg kg}^{-1}$ de P nas doses de 0, 1, 2 e 4 t ha^{-1} de gesso, respectivamente. A dose de 4 t ha^{-1} de gesso combinada a $12,1 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário proporcionou máxima concentração de K ($51,17 \text{ mg kg}^{-1}$). A saturação por alumínio foi reduzida a praticamente zero com as doses de 15,7, 15,9, 15,7 e $15,6 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário, combinado a 0, 1, 2 e 4 t ha^{-1} de gesso, respectivamente. As doses de 8,4 e $9,5 \text{ t ha}^{-1}$ calcário, combinadas a 0 e 4 t ha^{-1} de gesso proporcionaram as maiores concentrações de S-SO_4^{2-} ($8,28$ e $10,94 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente).

Na camada de 0,2-0,4 m não houve interação significativa entre doses de calcário e de gesso (Tabela 3). No entanto, as doses de calcário influenciaram os valores de pH, K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, CTC, V% e m%. De modo similar, as doses de gesso afetaram significativamente os valores de Ca, SB e S-SO_4^{2-} . Em relação às doses de calcário, modelos quadráticos foram ajustados para pH (Figura 4 a), K (Figura 4 d), Ca (Figura 4 e), Mg (Figura 4 f), H+Al (Figura

4 h), SB (Figura 4 i) e V% (Figura. 4b), modelos exponenciais para Al (Figura 4 g), linear para CTC (Figura a) e Fe (Figura 5a) e exponencial para m% (Figura d).

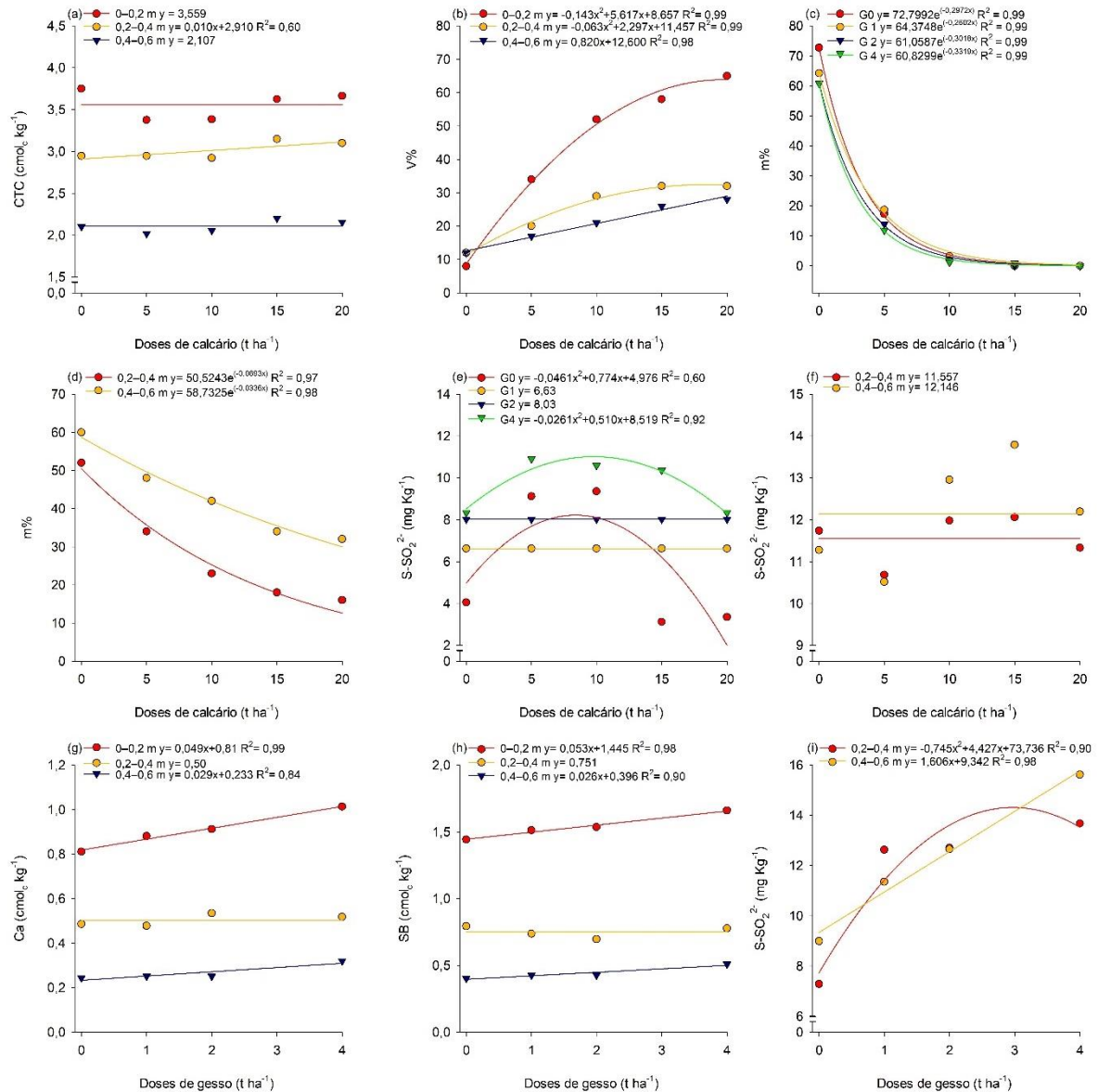


Figura 6 - Valores de CTC do solo na profundidade de 0,20-0,40 m (a), V% (b) em função das doses de calcário, m% (c) em função da interação entre as doses de calcário e gesso na profundidade de 0,0-0,20 m, m% (d) em função das doses de calcário nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, S-SO₄²⁻ (e) em função da interação entre as doses de calcário e gesso na profundidade de 0,0-0,20 m, S-SO₄²⁻ (f) em função doses de calcário nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, e Ca (g), SB (h) e S-SO₄²⁻ (i) em função das doses de gesso, no ano agrícola de 2019/2020. Currais, Piauí, Brasil.

Tabela 3 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,2-0,4 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado. Currais, Piauí.

Calcário (t ha ⁻¹)	pH	pH	COT	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Na	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	H ₂ O	g kg ⁻¹	- mg kg ⁻¹ -	----- cmol _c kg ⁻¹ -----						- % -		----- mg kg ⁻¹ -----							
0	3,64	4,43	5,63	1,86	12,14	0,25	0,06	0,39	2,58	0,35	2,93	12	52	0,53	11,69	0,19	0,10	206,45	38,71	1,52
5	3,88	4,63	5,63	1,94	12,95	0,40	0,17	0,29	2,35	0,59	2,94	20	34	0,52	10,65	0,17	0,11	187,10	33,06	1,40
10	4,07	5,08	5,63	2,51	12,95	0,54	0,27	0,24	2,09	0,83	2,92	29	23	0,56	11,94	0,18	0,10	161,29	30,65	1,73
15	4,24	5,21	6,10	2,02	18,61	0,68	0,40	0,19	2,09	1,00	3,09	32	18	0,62	12,02	0,18	0,11	145,16	29,03	1,44
20	4,24	5,05	5,63	1,86	14,57	0,64	0,38	0,19	2,06	0,99	3,05	32	16	0,52	11,29	0,15	0,11	145,97	28,23	1,36
Teste F	**	*	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
Gesso (t ha ⁻¹)																				
0	4,04	4,95	5,63	2,19	15,38	0,49	0,28	0,25	2,23	0,79	3,02	26	28	0,54	7,26	0,19	0,11	188,71	37,90	1,59
1	4,02	4,92	5,63	2,10	15,38	0,48	0,23	0,25	2,22	0,74	2,96	25	29	0,59	12,58	0,18	0,10	152,42	25,81	1,48
2	4,01	4,91	6,10	2,02	12,95	0,53	0,28	0,28	2,21	0,70	2,91	23	30	0,59	12,66	0,16	0,10	156,45	33,06	1,41
4	3,98	4,72	6,10	1,94	14,57	0,52	0,25	0,26	2,27	0,78	3,05	25	27	0,49	13,63	0,17	0,11	179,03	32,26	1,52
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	3,8	6,28	13,0	37,5	28,4	24,0	38,4	21,7	11,0	30,1	7,8	28,3	23,9	35,5	19,6	19,9	16,7	23,3	42,4	31,8

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

O maior pH H₂O foi obtido com 14 t ha⁻¹ de calcário. No entanto, a maior dose de calcário resultou nos maiores valores de pH_{CaCl₂} (4,8), K (15,72 mg kg⁻¹), Ca (0,6 cmolc kg⁻¹), Mg (0,4 cmolc kg⁻¹), SB (1,61 cmolc kg⁻¹) e V% (35%). A maior dose de calcário também levou aos menores valores de Al (0,16 cmolc kg⁻¹), H + Al (2,02 cmolc kg⁻¹), m% (11%) e Fe (136,29 mg kg⁻¹). Quanto às doses de gesso, um modelo quadrático foi ajustado para os valores de S-SO₄²⁻ (Figura i), com a dose de 3,0 t há⁻¹ resultando em uma maior concentração de S-SO₄²⁻ (14,27 mg kg⁻¹).

Para a camada de 0,4-0,6 m, não houve efeito significativo da interação entre doses de calcário e gesso (Tabela). Entretanto, as doses de calcário influenciaram significativamente os valores pH (Figura 4 a), K (Figura 4 d), Ca (Figura 4 e), Mg (Figura 4 f), Al (Figura 4 g), H+Al (Figura 4 h), SB (Figura 4 i), V% (Figura b) e m% (Figura d). Da mesma forma, as doses de gesso alteraram os valores de Ca (Figura g), SB (Figura h), S-SO₄²⁻ (Figura i) V% (Figura 5d) e m% (Figura 5e). De modo geral, houve ajuste do modelo linear aos dados para todas as variáveis, exceto m%, para a qual houve ajuste de um modelo quadrático. Nesta profundidade, a maior dose de calcário (20 t ha⁻¹) promoveu os maiores valores de pH (4,15), Ca (0,47 cmolc dm⁻³), Mg (0,29 cmolc dm⁻³), SB (0,81 cmolc dm⁻³) e V% (29%). Da mesma forma, esta dose de calcário proporcionou os menores valores de K (16 mg dm⁻³), Al (0,36 cmolc dm⁻³), H+Al (2,0 cmolc dm⁻³) e m% (32%). Quanto ao gesso, a maior dose (4 t ha⁻¹) promoveu os maiores valores de Ca (0,40 cmolc dm⁻³), SB (0,66 cmolc dm⁻³), V% (22%) e de S-SO₄²⁻ (20,7 mg dm⁻³), e o menor valor de m% (37%).

Para a camada de 0,4-0,6 m, não houve efeito significativo da interação entre as doses de calagem e gesso (Tabela). No entanto, as doses de calagem influenciaram significativamente os valores de pH (Figura 4 a), K (Figura 4 d), Ca (Figura 4 e), Mg (Figura 4 f), Al (Figura 4 g), H+Al (Figura 4 h), SB (Figura 4 i), V% (Figura b) e m% (Figura d). Da mesma forma, as doses de gesso alteraram os valores de Ca (Figura g), SB (Figura h), S-SO₄²⁻ (Figura i), V% (Figura 5d) e m% (Figura 5e). No geral, houve um ajuste de modelo linear aos dados para todas as variáveis, exceto m%, para a qual foi ajustado um modelo quadrático. Nessa profundidade, a maior dose de calagem (20 t ha⁻¹) promoveu os maiores valores de pH _{CaCl₂} (4,15), pH H₂O (4,60), Ca (0,36 cmolc kg⁻¹), Mg (0,22 cmolc kg⁻¹), SB (0,62 cmolc kg⁻¹) e V% (29%). Da mesma forma, essa dose de calagem resultou nos menores valores de K (12,21 mg kg⁻¹), Al (0,27 cmolc kg⁻¹), H + Al (1,53 cmolc kg⁻¹) e m% (32%). Quanto ao gesso, a maior dose (4 t ha⁻¹) levou aos maiores valores de Ca (0,31 cmolc kg⁻¹), SB (0,50 cmolc kg⁻¹), V% (22%) e S-SO₄²⁻ (15,80 mg kg⁻¹) e ao menor valor de m% (37%).

Tabela 4 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,4-0,6 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado, Currais, Piauí.

Calcário (t ha ⁻¹)	pH	pH	COT	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Na	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	H ₂ O	g kg ⁻¹	- mg kg ⁻¹ -								- % -					mg kg ⁻¹			
0	3,79	4,09	4,12	1,76	15,27	0,17	0,05	0,38	1,85	0,25	2,10	12	60	0,81	11,30	0,09	0,12	164,89	50,38	1,37
5	3,88	4,24	4,16	1,76	16,03	0,21	0,10	0,33	1,67	0,35	2,02	17	48	0,92	10,53	0,14	0,14	158,02	54,96	1,22
10	3,97	4,38	4,65	1,60	14,50	0,27	0,14	0,33	1,63	0,44	2,07	21	42	0,77	12,98	0,12	0,11	143,51	53,44	1,64
15	4,11	4,57	4,96	1,76	12,98	0,34	0,19	0,29	1,63	0,57	2,20	26	34	0,84	13,82	0,18	0,11	140,46	50,38	1,51
20	4,11	4,53	4,29	2,06	12,21	0,34	0,21	0,28	1,56	0,59	2,15	28	32	0,86	12,21	0,15	0,14	171,76	77,86	1,32
Teste F	**	**	ns	ns	*	**	**	*	*	**	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Gesso (t ha ⁻¹)																				
0	3,98	4,45	4,34	1,68	14,50	0,24	0,12	0,34	1,70	0,40	2,10	19	47	0,86	9,01	0,16	0,13	159,54	58,02	1,33
1	3,98	4,35	4,34	1,68	14,50	0,25	0,14	0,32	1,66	0,43	2,09	20	44	0,83	11,37	0,15	0,13	150,38	47,33	1,50
2	3,96	4,34	4,34	1,68	13,74	0,25	0,14	0,34	1,62	0,43	2,05	21	44	0,83	12,67	0,14	0,11	154,96	58,02	1,54
4	3,99	4,31	4,74	1,91	15,27	0,32	0,15	0,29	1,70	0,51	2,21	22	37	0,83	15,65	0,15	0,12	158,02	67,18	1,29
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	2,9	3,5	26,6	24,4	23,1	27,7	35,0	29,7	13,8	25,4	12,4	2,2	21,6	26,7	28,4	43,4	33,9	27,3	34,1	41,6

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

4.2 Fertilidade do solo no segundo ano de cultivo

No ano agrícola de 2020/2021, não houve interação significativa entre as doses de calcário e gesso para nenhum dos atributos analisados na camada de 0-0,2 m (Tabela). No entanto, houve um efeito significativo das doses de calcário para os valores de pH (Figura a), P (Figura b), K (Figura c), Ca (Figura d), Mg (Figura e), Al (Figura f), H + Al (Figura g), SB (Figura h), CTC (Figura i), V% (Figura a), m% (Figura b), S-SO₄²⁻ (Figura c) e Fe (Figura d).

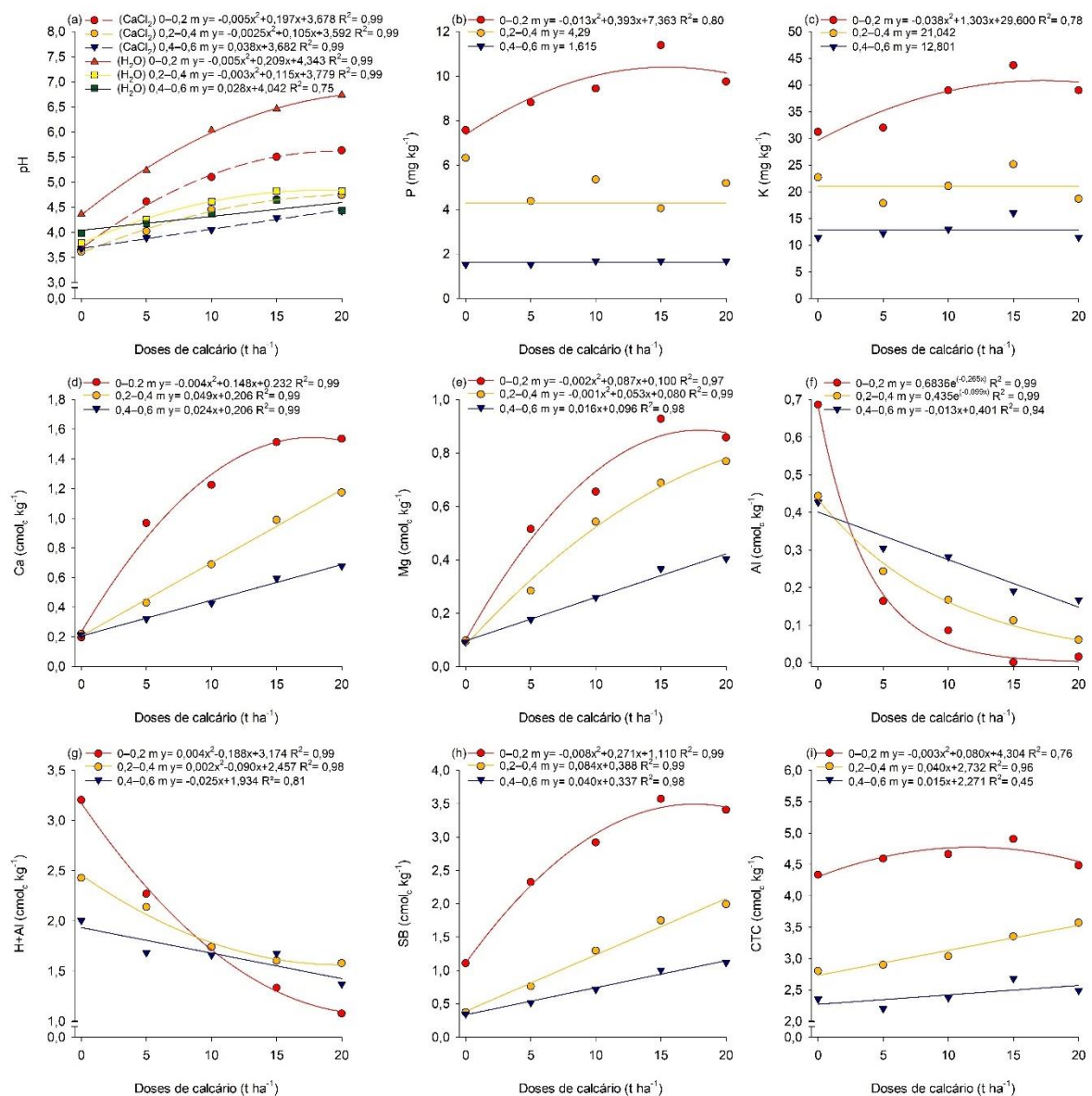


Figura 7 - Dados de pH (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e), Al (f), H + Al (g), SB (h) e CTC (i) em função das doses de calcário nas profundidades de 0,0–0,10, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, no ano agrícola de 2020/2021. Currais, Piauí, Brasil.

Tabela 5 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0-0,2 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais, Piauí.

Calcário (t ha ⁻¹)	pH	pH	COT	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Na	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	H ₂ O	g kg ⁻¹	- mg kg ⁻¹	-	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	- % -	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0	3,65	4,36	9,97	7,58	31,25	0,20	0,09	0,69	3,21	1,11	4,32	26	39	0,52	2,42	0,30	0,10	197,66	46,09	1,72
5	4,61	5,23	10,88	8,83	32,03	0,97	0,52	0,16	2,27	2,33	4,60	50	7	0,44	3,20	0,30	0,10	154,69	52,34	1,41
10	5,1	6,03	10,88	9,45	39,06	1,23	0,66	0,09	1,74	2,92	4,66	62	2,9	0,62	3,36	0,28	0,10	112,50	50,00	1,72
15	5,5	6,45	10,88	11,41	43,75	1,52	0,93	0,00	1,34	3,58	4,92	73	0,1	0,49	3,91	0,31	0,10	77,34	46,88	1,56
20	5,63	6,73	11,33	9,77	39,06	1,54	0,86	0,02	1,08	3,41	4,49	76	0,5	0,63	3,05	0,28	0,11	53,91	45,31	1,33
Teste F	**	**	ns	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	*	ns	ns	**	ns	ns
Gesso (t ha ⁻¹)																				
0	4,93	5,73	10,88	8,67	40,63	1,08	0,63	0,17	1,84	2,78	4,62	59	9,5	0,49	3,20	0,32	0,10	96,88	53,91	1,56
1	4,89	5,69	10,42	10,78	37,50	1,03	0,62	0,23	2,02	2,62	4,64	56	11,1	0,55	2,97	0,27	0,11	126,56	44,53	1,48
2	4,95	5,89	10,88	10,00	32,03	1,14	0,63	0,19	1,88	2,62	4,50	58	9,6	0,59	2,97	0,30	0,10	130,47	42,97	1,48
4	4,84	5,72	10,88	8,05	37,50	1,10	0,57	0,18	1,98	2,66	4,64	57	9,5	0,52	3,67	0,29	0,10	123,44	53,13	1,64
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	5,3	5,6	11,9	40,2	25,8	19,1	18,3	41,2	20,5	15,8	11,5	9,9	52,1	35,2	38,9	31,0	17,3	34,1	44,6	28,5

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F. Os dados de alumínio foram transformados em raiz quadrada.

Em geral, modelos quadráticos foram ajustados para todas as variáveis, exceto para Al e Fe, para os quais os modelos ajustados foram exponenciais e lineares, respectivamente. As doses de 20, 15,5, 17,2, 17,6, 18,1, 17,6, 11,9, 20,0 e 12,3 t ha⁻¹ de calcário proporcionaram valores mais altos de pH (5,62 CaCl₂, 6,52 H₂O), P (10,39 mg kg⁻¹), K (40,86 mg kg⁻¹), Ca (1,56 cmolc kg⁻¹), Mg (0,86 cmolc kg⁻¹), SB (3,52 cmolc kg⁻¹), CTC (4,76 cmolc kg⁻¹), V% (76%) e S-SO₄²⁻ (3,67 mg kg⁻¹), respectivamente. Por sua vez, as doses de calagem de 16,3, 20, 15,9 e 20 t ha⁻¹ resultaram nos menores valores de Al (0 cmolc kg⁻¹), H + Al (1,09 cmolc kg⁻¹), m% (0%) e Fe (46,25 mg kg⁻¹), respectivamente. Neste ano agrícola, não houve efeito das doses de gesso sobre as variáveis.

Na profundidade de 0,2-0,4 m, não houve interação significativa entre doses de calcário e gesso (Tabela 6). Observou-se efeito isolado significativo das doses calcário sobre os valores de pH (Figura a), Ca (Figura d), Mg (Figura e), Al (Figura f), H + Al (Figura g), SB (Figura h), CTC (Figura i), V% (Figura a), m% (Figura b), S-SO₄²⁻ (Figura c) e Fe (Figura d). Quanto ao gesso, houve efeito significativo das doses apenas para a concentração de S-SO₄²⁻ (Figura e). A maior dose de calcário (20 t ha⁻¹) proporcionou os maiores valores de pH CaCl₂ (4,7), pH H₂O (4,9), Ca (1,18 cmolc kg⁻¹), Mg (0,82 cmolc kg⁻¹), SB (1,24 cmolc kg⁻¹), CTC (3,52 cmolc kg⁻¹) e V% (55%) e os menores valores de Al (0,02 cmolc kg⁻¹), H + Al (1,56 cmolc kg⁻¹), S-SO₄²⁻ (4,18 mg kg⁻¹) e Fe (115,32 mg kg⁻¹). A aplicação de 2,2 t ha⁻¹ de gesso resultou na maior concentração de S-SO₄²⁻ (6,37 mg kg⁻¹).

Na profundidade de 0,4–0,6 m, não houve interação significativa entre doses de calcário e gesso (Tabela). As doses de calcário influenciaram significativamente os valores de pH (Figura a), K (Figura c), Ca (Figura d), Mg (Figura e), Al (Figura f), H + Al (Figura g), SB (Figura h), CTC (Figura i), V% (Figura a) e m% (Figura b), com modelos quadráticos ajustados para todas as variáveis, exceto m%, para a qual ajustou-se um modelo exponencial decrescente. As doses de gesso alteraram significativamente os valores de S-SO₄²⁻ (Figura e) e Cu (Figura f), para os quais foram ajustados modelos lineares crescentes e decrescentes, respectivamente. A aplicação da maior dose de calcário (20 t ha⁻¹) resultou nos maiores valores de pH CaCl₂ (4,45), pH H₂O (4,6), Ca (0,69 cmolc kg⁻¹), Mg (0,34 cmolc kg⁻¹), SB (1,15 cmolc kg⁻¹), CTC (2,58 cmolc kg⁻¹) e V% (44%) e nos menores valores de Al (0,14 cmolc kg⁻¹), H + Al (1,43 cmolc kg⁻¹) e m (14%). A dose de gesso de 2,9 t ha⁻¹ resultou no menor valor de S-SO₄²⁻ (12,06 mg kg⁻¹) e a dose de 4,0 t ha⁻¹ de gesso proporcionou o menor valor de Cu (0,17 mg kg⁻¹).

Tabela 6 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,2-0,4 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado. Currais, Piauí.

Calcário (t ha ⁻¹)	pH	pH	COT	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Na	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	H ₂ O	g kg ⁻¹	- mg kg ⁻¹ -	----- cmol _c kg ⁻¹ -----					- % -			----- mg kg ⁻¹ -----							
0	3,61	3,79	9,39	6,31	22,66	0,22	0,10	0,44	2,43	0,37	2,80	13	54	0,68	6,29	0,19	0,11	204,03	83,87	1,13
5	4,02	4,25	8,45	4,37	17,81	0,43	0,28	0,24	2,14	0,76	2,90	26	26	0,63	6,53	0,20	0,13	197,58	115,32	1,29
10	4,45	4,61	8,45	5,34	21,04	0,69	0,54	0,17	1,74	1,29	3,03	42	14	0,59	4,52	0,18	0,11	125,00	95,16	0,97
15	4,65	4,82	9,39	4,05	25,09	0,99	0,69	0,11	1,60	1,75	3,35	51	8	0,56	4,60	0,20	0,13	113,71	114,52	1,05
20	4,74	4,81	9,39	5,18	18,61	1,17	0,77	0,06	1,58	1,99	3,57	54	5	0,77	4,27	0,15	0,10	121,77	87,90	1,29
Teste F	**	**	ns	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	ns	ns	**	ns	ns
Gesso (t ha ⁻¹)																				
0	4,26	4,47	8,92	4,05	22,66	0,67	0,47	0,22	1,94	1,20	3,14	36	22	0,62	4,27	0,19	0,12	160,48	97,58	1,21
1	4,26	4,54	9,39	5,26	20,23	0,70	0,50	0,23	1,89	1,25	3,14	37	24	0,70	5,56	0,19	0,11	144,35	89,52	1,13
2	4,3	4,51	8,45	4,69	17,81	0,66	0,44	0,17	1,75	1,15	2,90	38	21	0,62	6,45	0,17	0,11	149,19	102,42	1,13
4	4,39	4,30	9,86	6,07	22,66	0,77	0,51	0,19	2,02	1,33	3,35	38	18	0,65	4,76	0,19	0,13	155,65	108,06	1,21
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	5,3	9,13	23,7	43,9	33,8	38,3	32,7	47,9	17,4	34,4	14,8	23,1	40,1	42,7	27,6	26,4	33,9	32,6	33,4	20,1

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 7 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de atributos químicos do solo (0,4-0,6 m) em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais, Piauí.

Calcário (t ha ⁻¹)	pH	pH	COT	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	Na	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	H ₂ O	g kg ⁻¹	- mg kg ⁻¹ -																
0	3,67	3,79	4,43	1,53	11,45	0,21	0,09	0,43	2,01	0,35	2,36	15	56	0,63	8,63	0,19	0,30	164,12	106,11	1,37
5	3,89	4,25	4,43	1,53	12,21	0,32	0,18	0,31	1,69	0,52	2,21	23	38	0,69	9,77	0,21	0,21	138,93	95,42	1,30
10	4,05	4,61	4,43	1,68	12,98	0,43	0,26	0,28	1,66	0,72	2,38	30	30	0,67	11,07	0,21	0,32	148,85	105,34	1,45
15	4,29	4,83	5,31	1,68	16,03	0,60	0,37	0,19	1,68	1,01	2,69	37	17	0,51	10,61	0,21	0,31	143,51	93,13	1,37
20	4,43	4,82	4,87	1,68	11,45	0,68	0,40	0,17	1,37	1,12	2,49	44	15	0,53	10,23	0,18	0,29	151,15	122,90	1,60
Teste F	**	**	ns	ns	ns	**	*	**	**	**	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Gesso (t ha ⁻¹)																				
0	4,07	4,47	5,31	1,68	13,74	0,44	0,28	0,27	1,63	0,76	2,39	31	30	0,68	7,40	0,20	0,37	146,56	103,82	1,53
1	4,08	4,55	4,43	1,60	12,21	0,42	0,25	0,27	1,71	0,72	2,43	29	31	0,64	9,77	0,21	0,33	148,85	96,18	1,37
2	4,11	4,52	4,87	1,60	11,45	0,48	0,25	0,25	1,72	0,77	2,49	30	30	0,63	11,76	0,18	0,24	148,85	100,00	1,30
4	4,02	4,30	4,87	1,83	13,74	0,44	0,24	0,30	1,68	0,73	2,41	30	32	0,50	11,37	0,21	0,19	151,91	116,79	1,53
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	4,4	9,13	22,1	32,4	33,3	35,3	40,8	22,7	15,6	35,2	13,8	25,3	24,5	44,3	28,2	21,9	44,3	23,6	40,9	24,2

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

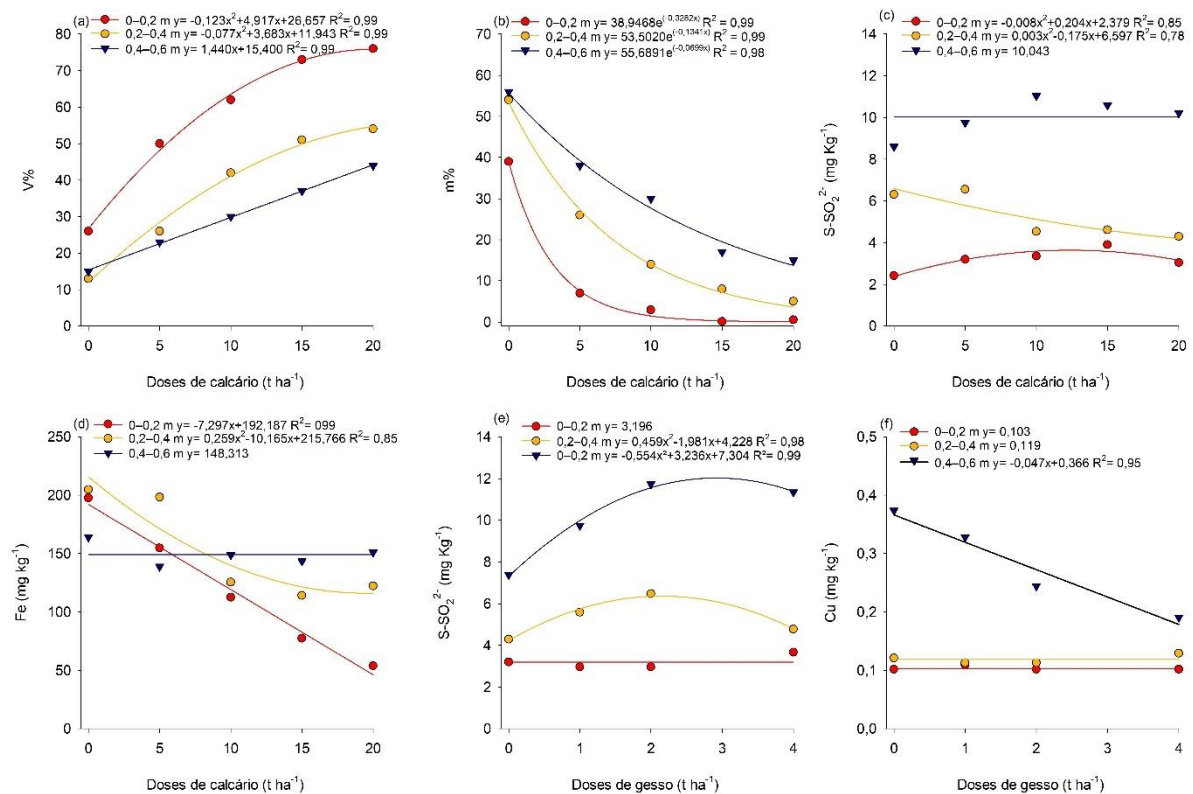


Figura 8 - Dados de V% (a), m% (b), S-SO₄²⁻ (c) e Fe (d) em função das doses de calagem e S-SO₄²⁻ (e) e Cu (f) em função das doses de gesso nas profundidades de 0,0-0,10, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, no ano agrícola de 2020/2021. Currais, Piauí, Brasil.

4.3 Cálcio e magnésio não trocáveis nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021

No ano agrícola 2019/2020, as concentrações de Ca, Mg e Ca⁺Mg não trocáveis foram significativamente influenciadas pelas doses de calcário e de gesso individualmente e pela interação desses fatores, exceto o Mg não trocável (Tabela 8).

Entretanto, no ano agrícola 2020/2021, houve efeito significativo apenas das doses de calcário sobre os valores de Ca, Mg e Ca⁺Mg não trocáveis. De modo geral, foram ajustados modelos lineares crescentes para todas as variáveis, com exceção do Mg em função de doses de calcário no ano agrícola de 2019-2020, para o qual foi ajustado um modelo quadrático (Figura). Para melhor entendimento sobre a quantidades de calcário residual, os dados convertidos em porcentagem de calcário efetivamente reagido foram apresentados na Tabela .

Tabela 8 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação (CV) para Ca, Mg e Ca + Mg não trocáveis no solo (0,0-0,2 m) em função de diferentes doses de calagem e gesso na soja (safras 2019/2020 e 2020/2021) em uma área de Cerrado, Currais, Piauí, Brasil.

	Ca não trocável	Mg não trocável	Ca + Mg não trocável	Ca não trocável	Mg não trocável	Ca + Mg não trocável
Calcário (t ha ⁻¹)	----- cmol _c kg ⁻¹ -----					
	Safr 2019/2020			Safr 2020/2021		
0	0,08	0,05	0,13	0,34	0,05	0,39
5	0,61	0,44	1,05	0,67	0,26	0,93
10	1,60	1,08	2,68	0,98	0,43	1,41
15	2,62	1,65	4,27	1,52	0,89	2,41
20	3,73	2,52	6,25	2,13	1,16	3,29
Teste F	**	**	**	**	**	**
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	1,41	0,95	2,36	1,29	0,52	1,81
1	1,62	1,05	2,67	1,16	0,72	1,88
2	1,71	1,12	2,83	1,25	0,66	1,91
4	2,18	1,47	3,65	0,84	0,37	1,21
Teste F	**	**	*	ns	ns	ns
C x G	*	ns	*	ns	ns	ns
CV(%)	36,8	39,9	37,1	46,8	45,5	47,7

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 9 - Valores médios (%) de calcário residual (Ca + Mg não trocáveis) em função de doses de calcário e gesso em soja, camada 0-0,2 m. Currais, Piauí.

Calcário	Calcário residual (%)	
t ha ⁻¹	2019/2020	2020/2021
5	51	28
10	61	33
15	67	47
20	74	53
Gesso (t ha ⁻¹)		
0	61	43
1	63	42
2	63	41
4	65	35

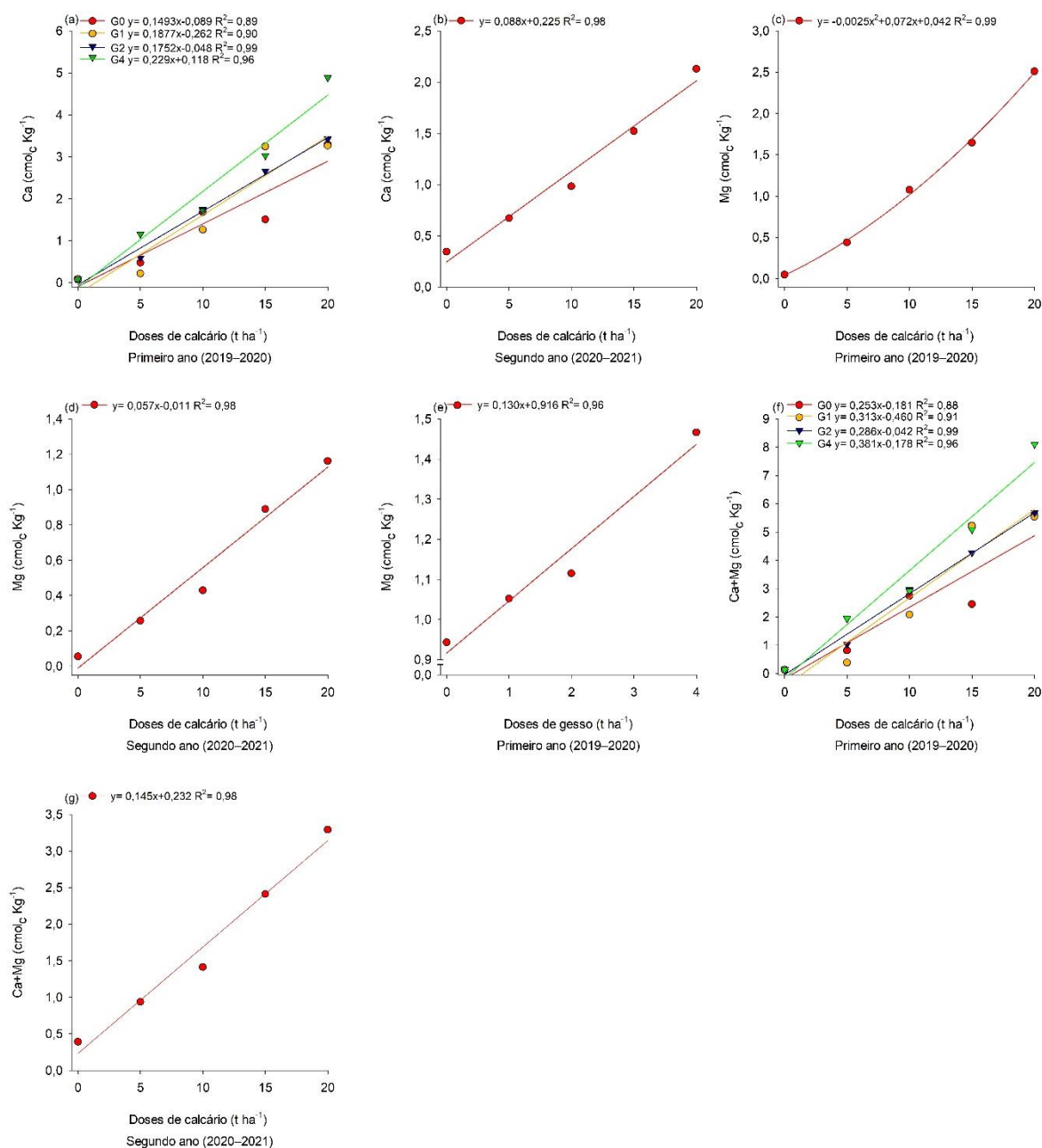


Figura 9 - Teores de Ca (a, b), Mg (c, d, e) e Ca + Mg (f, g) não trocáveis em função das doses isoladas de calcário (b, c, d, g), de gesso (e) e da interação entre doses de calcário e gesso (a, f), na camada de 0–0,2 m do solo, nas safras de 2019/2020 e 2020/2021. Currais, Piauí.

4.4 Estado nutricional da soja nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021

Não houve interação entre doses de calcário e gesso para teores de macro e micronutrientes em folhas de soja, nos dois anos agrícolas avaliados. No ano agrícola

2019/2020, todas as concentrações de nutrientes, exceto o enxofre (S) e boro (B), foram afetadas pelas doses de calcário. Ao mesmo tempo, as doses de gesso tiveram impacto nos teores de Ca, Mg e S. No ano agrícola 2020/2021, apenas os teores de S e B não foram influenciados pelas doses de calcário. As doses de gesso, por sua vez, afetaram significativamente apenas os níveis de K e B (Tabela 10).

Tabela 10 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de macro e micronutrientes na folha diagnóstica em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safras 2019/2020 e 2020/2021) em área de Cerrado. Currais, Piauí.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
Calcário (t ha ⁻¹)	Safr 2019/2020										
0	39,4	2,9	19,7	5,4	4,1	3,7	42	2,9	150	159	37
5	37,1	2,7	20,3	6,6	4,7	3,8	40	2,7	126	103	28
10	37,2	2,8	21,1	7,6	4,7	3,1	41	2,9	131	112	26
15	37,3	2,7	21,6	7,8	4,8	3,3	44	3,3	127	109	24
20	35,5	2,4	21,8	8,2	4,8	3,8	42	3,3	129	89	22
Teste F	**	**	**	**	**	ns	ns	*	**	**	**
Gesso (t ha ⁻¹)											
0	36,9	2,8	20,4	7,0	4,7	2,9	43	2,9	136	114	26
1	37,3	2,7	20,9	7,0	4,6	3,2	43	2,9	136	113	27
2	36,9	2,6	20,2	7,5	4,8	3,0	40	2,9	133	120	28
4	38,0	2,7	22,0	7,1	4,3	4,4	41	3,2	126	112	30
Teste F	ns	ns	ns	**	**	**	ns	ns	ns	ns	**
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	4,6	5,1	6,8	7,9	7,5	43,4	9,9	22,2	10,6	23,2	8,9
Calcário (t ha ⁻¹)	Safr 2020/2021										
0	36,8	3,02	21,9	5,42	3,47	1,62	47	4,2	164	74	36
5	39,9	3,54	23,2	6,15	5,13	1,82	40	3,8	89	31	26
10	40,0	3,92	25,0	6,42	5,70	1,88	41	3,4	80	25	23
15	38,6	3,94	23,2	6,54	5,50	1,64	40	3,2	68	24	23
20	38,0	4,38	23,2	6,82	6,05	1,71	41	4,7	81	22	21
Teste F	**	**	**	**	**	ns	ns	**	**	**	**
Gesso (t ha ⁻¹)											
0	39,0	3,94	24,5	6,08	5,13	1,77	43	4,2	91	34	26
1	39,4	3,66	23,6	6,21	5,03	1,69	43	3,9	101	36	24
2	38,2	3,67	22,3	6,54	5,52	1,68	42	3,9	103	34	24
4	38,2	3,77	23,0	6,25	5,00	1,84	40	3,5	92	38	29
Teste F	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	6,0	15,2	7,5	14,6	17,1	17,6	6,8	38,4	30,7	15,2	10,9

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

Para uma análise mais detalhada das concentrações foliares, foram ajustados modelos lineares e quadráticos para N (Figura a), P (Figura b), K (Figura c), Ca (Figura d), Mg (Figura e), Cu (Figura f), Fe (Figura g), Mn (Figura h) e Zn (Figura i) em resposta à calagem.

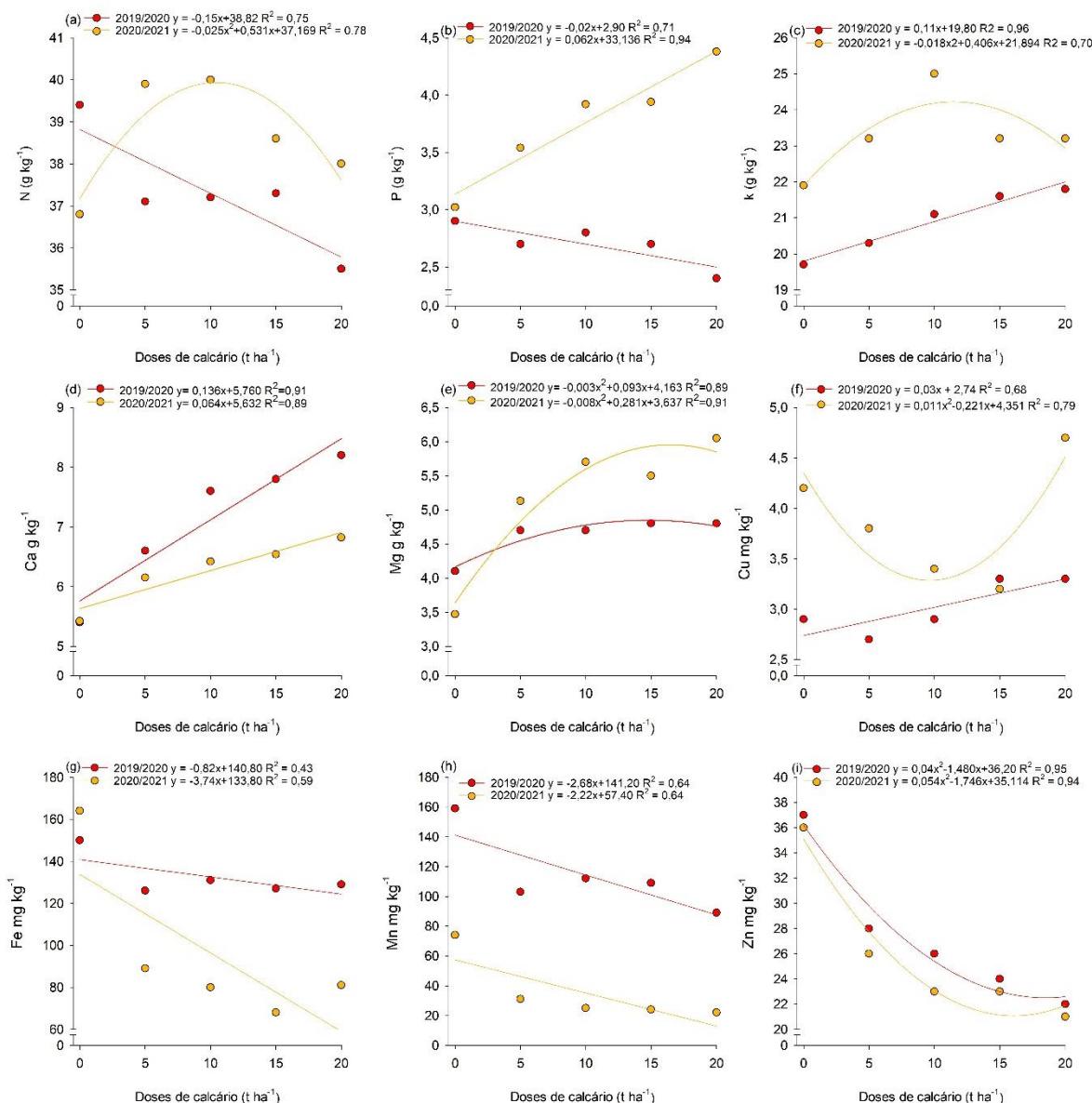


Figura 10 - Teores foliares de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e), Cu (f), Fe (g), Mn (h) e Zn (i) em plantas de soja, em função das doses de calcário nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.

Da mesma forma, foram ajustados modelos lineares e quadráticos para Ca (Figura a), Mg (Figura b), S (Figura c) K (Figura d), B (Figura e) e Zn (Figura f) em resposta gessagem.

No ano agrícola de 2019/2020, a maior dose de calcário (20 t ha⁻¹) reduziu os níveis foliares de N (36 g kg⁻¹), P (2,5 g kg⁻¹), Fe (124 mg kg⁻¹), Mn (96 mg kg⁻¹) e Zn (23 mg kg⁻¹). No entanto, essa mesma dose resultou em maiores concentrações de K (22 g kg⁻¹), Ca (8,5 g

kg⁻¹), Mg (4,9 g kg⁻¹) e Cu (3,3 mg kg⁻¹). As doses de gesso 2,3, 1,2, 4,0 e 4,0 t ha⁻¹ proporcionaram as maiores concentrações de Ca, Mg, S e Zn, respectivamente.

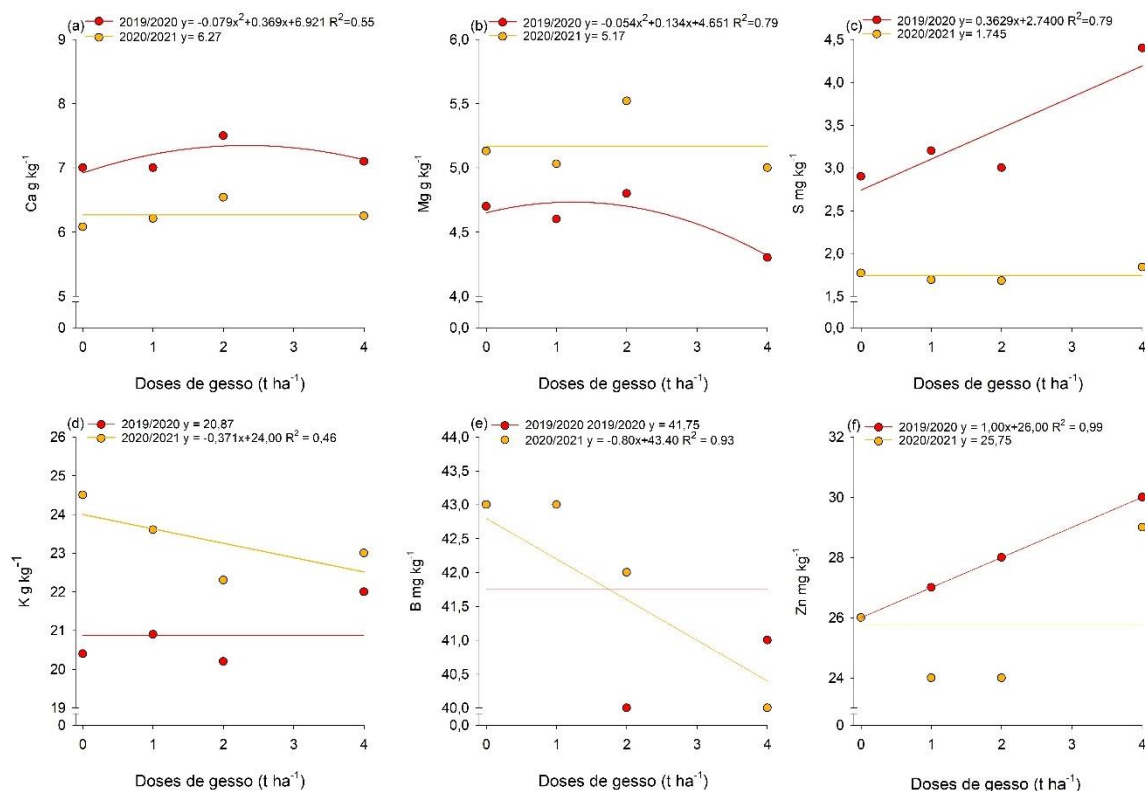


Figura 11 - Teores foliares de Ca (a), Mg (b), S (c) K (d) B (e) e Zn (f) em plantas de soja, em resposta a aplicação de doses de gesso nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.

No ano agrícola de 2020/2021, as doses de calcário 10,4, 20, 11,5, 20 e 16,6 t ha⁻¹ proporcionaram os maiores níveis de N (39,9 g kg⁻¹), P (4,4 g kg⁻¹), K (24,2 g kg⁻¹), Ca (6,9 g kg⁻¹) e Mg (6 g kg⁻¹). Contudo, a maior dose de calcário (20 t ha⁻¹) levou aos menores níveis de Fe (59 mg kg⁻¹) e Mn (13 mg kg⁻¹). Quanto ao gesso, a maior dose (4 t ha⁻¹) resultou nas menores concentrações de K (22,5 g kg⁻¹) e B (40 mg kg⁻¹).

4.5 Dados biométricos e produtividade da soja nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021

No primeiro ano, observou-se efeito da interação entre as doses de gesso e calcário nas variáveis de diâmetro do caule (DC) e altura da planta (AP). Foram observados efeito isolado para as variáveis massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR) e produtividade (PROD). Para as doses isoladas de gesso, foi observado efeito significativo apenas para a variável volume de raiz (VR) conforme pode ser observado na (Tabela).

Tabela 11 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de dados biométricos para altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR), volume de raiz (VR) e produtividade (PROD) da soja em função da aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2019/2020) em área de Cerrado, Currais, Piauí.

	AP	DC	MSPA	MSR	VR	PROD
Calcário (t ha ⁻¹)	cm	mm	g	g	mL	kg ha ⁻¹
0	35,23	6,31	66,11	12,34	55,62	971
5	42,30	7,16	134,28	18,29	49,06	1916
10	42,52	7,415	139,29	20,32	59,37	2275
15	46,99	8,05	149,66	21,46	51,87	2375
20	45,10	7,64	143,37	20,59	47,18	2298
Teste F	***	***	***	***	ns	***
CV(%)	7,92	9,62	32,66	24,01	62,94	16,73
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	43,50	7,82	114,20	17,65	53,00	1895,55
1	46,28	8,02	121,58	18,51	71,00	1763,70
2	44,46	7,46	130,161	19,51	49,75	1836,40
4	35,46	5,96	140,23	19,06	36,75	1932,55
Teste F	***	***	ns	ns	*	ns
CV(%)	6,80	7,42	27,82	19,46	64,38	11,53
C x G	***	***	ns	ns	ns	ns

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

No ano agrícola de 2020/2021, foi observado efeito significativo das doses de gesso apenas para VR. No entanto, as doses de calcário tiveram efeito significativo em todas as variáveis avaliadas (Tabela).

Tabela 12 - Valores médios, teste F e coeficiente de variação de dados biométricos para altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR), volume de raiz (VR) e produtividade (PROD) da soja em função da

aplicação de doses de calcário e gesso na cultura da soja (safra 2020/2021) em área de Cerrado, Currais, Piauí.

	AP	DC	MSPA	MSR	VR	PROD
Calcário (t ha ⁻¹)	cm	mm	g	g	mL	kg ha ⁻¹
0	38,36	4,76	50,51	8,08	23,625	557
5	60,81	6,686	107,43	15,64	39,625	1788
10	64,54	6,846	118,51	16,08	44,625	2063
15	62,12	6,81	110,27	15,68	42,625	1956
20	64,56	6,10	99,99	13,07	30,125	2054
Teste F	*	***	***	***	**	***
CV(%)	17,53	15,31	23,09	23,03	35,62	14,70
Gesso (t ha ⁻¹)						
0	59,92	6,01	102,61	13,61	31,10	1554,30
1	56,38	6,32	91,73	14,22	36,55	1540,20
2	56,96	6,41	98,32	14,67	40,95	1609,45
4	59,05	6,21	96,71	12,33	35,90	1528,35
Teste F	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV(%)	12,80	13,14	20,29	27,31	28,06	9,49
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Note: ns, * e ** - Não significativo, significativa 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

O desdobramento das interações entre calcário e gesso para a variável AP pode ser observado nas (Figura a e Figura b), por outro lado, o efeito isolado do calcário durante a segunda safra também apresentou um efeito quadrático na variável AP como pode ser observado na (Figura c).

A aplicação gradual de diferentes doses de calcário resultou em um padrão quadrático na interação entre calcário e gesso durante a primeira safra, com exceção da interação entre 4 t ha⁻¹ de gesso e as doses calcário, que apresentou um comportamento linear crescente, bem como da interação entre 0 t ha⁻¹ de calcário e dentro das doses de gesso, que teve comportamento linear decrescente. Os melhores resultados na primeira safra para essa variável, foram alcançados quando 1 t ha⁻¹ de gesso foi combinado com 13,70 t ha⁻¹ de calcário, resultando em altura média de 47,7 cm. No entanto, para a interação entre 0 e 2 t ha⁻¹ de gesso, o crescimento da planta foi semelhante. No caso da interação em que o gesso analisado dentro das doses de calcário, a melhor resposta foi obtida com 15 t ha⁻¹ de calcário combinada 2,6 t ha⁻¹ de gesso, resultando em altura média de 50,75 cm. Na segunda safra, a aplicação de 14 t ha⁻¹ de calcário proporcionou altura máxima média da planta de 66,85 cm.

Para a variável DC, no primeiro ano de cultivo, observou-se um comportamento semelhante ao da variável AP. (Figura d Figura e e Figura f) O diâmetro máximo também foi alcançado na interação entre 1 t ha⁻¹ de gesso e 13,4 t ha⁻¹ de calcário, resultando em um diâmetro médio de 8,61 mm. Para a interação entre 2 t ha⁻¹ de gesso e calcário, o diâmetro médio foi de 8,07 mm, com a mesma dose de calcário. Na interação em que o gesso foi aplicado dentro de calcário, a dose de 15 t ha⁻¹ de calcário se manteve constante, independentemente da dose de gesso aplicada. Para o efeito isolado do calcário, no segundo cultivo, o diâmetro máximo foi alcançado com a aplicação de 12 t ha⁻¹ de calcário atingindo o valor máximo de 7,0 mm.

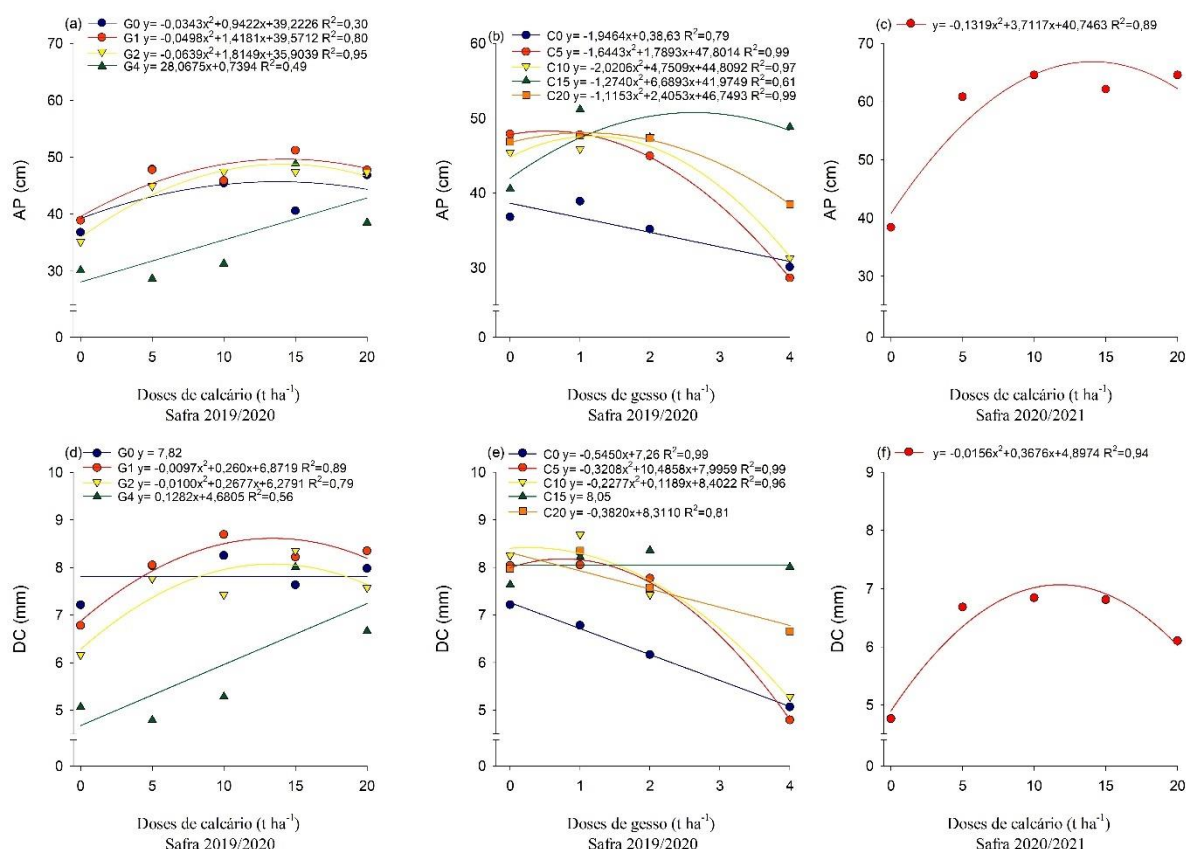


Figura 12 - Altura da planta (AP) (a, b, c) e diâmetro do caule (DC) (d, e, f) de plantas de soja em resposta a aplicação de doses de calcário e gesso nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.

Para a variável MSPA, observou-se uma resposta quadrática (Figura a e Figura b). As doses que proporcionaram maior acúmulo de massa seca foram de 14 t ha⁻¹ no primeiro ano e 12 t ha⁻¹ no segundo ano de cultivo, resultando em massas acumuladas de 152 g e 121 g, respectivamente.

Comportamento quadrático também foi observado para a variável MSR no primeiro e segundo ano de cultivo (Figura c e Figura 11d). A dose 15 t ha⁻¹ de calcário no primeiro ano

resultou em maior acúmulo de MSR (21,7 g) e a dose de 12 t ha⁻¹ de calcário no segundo ano em 16,97 g de MSR.

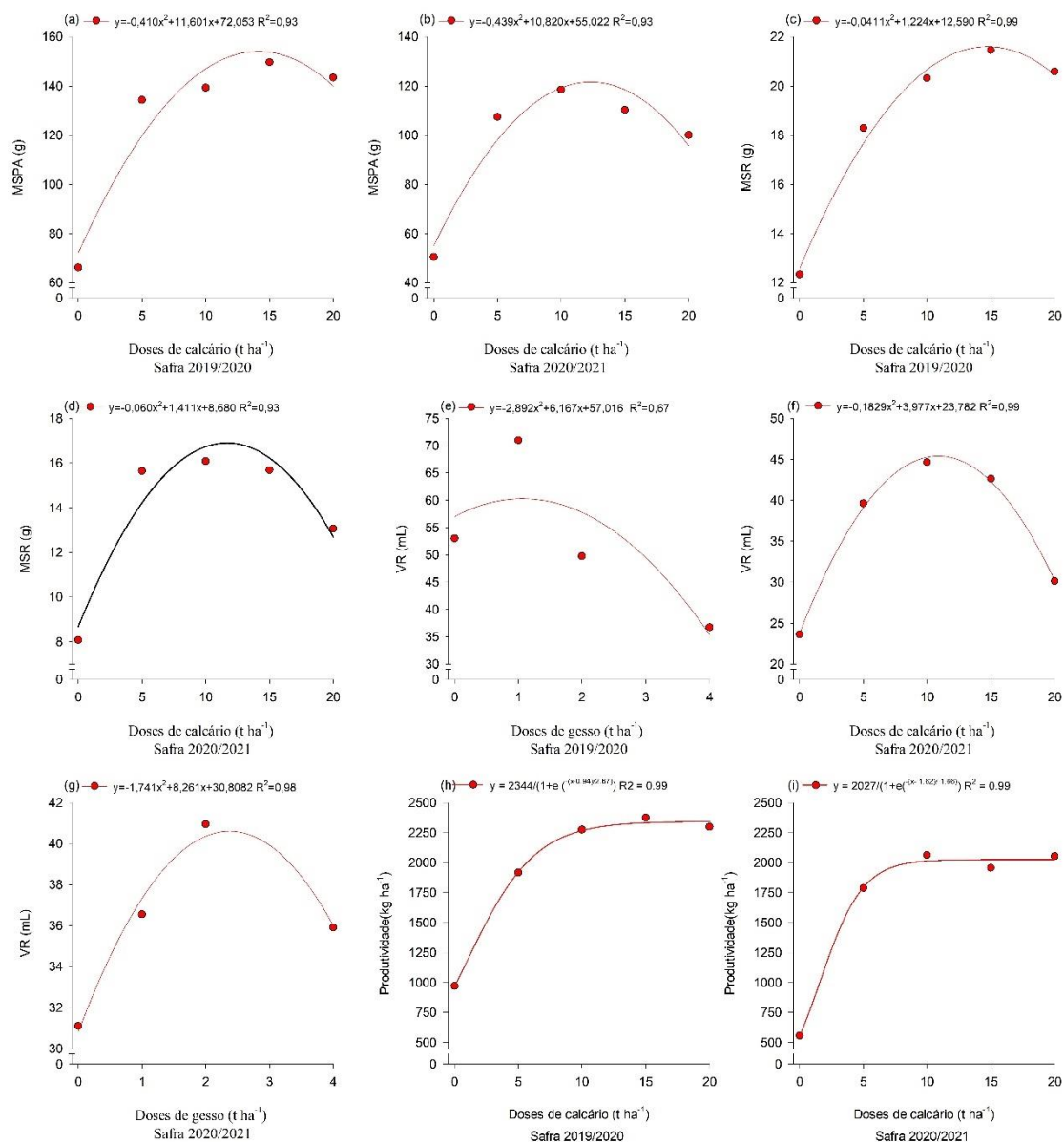


Figura 13 - Massa seca da parte aérea (MSPA) (a, b), massa seca da raiz (MSR) (c, d), volume de raiz (VR) (e, f, g) e produtividade (PROD) (h, i) da soja em resposta a doses de calcário e gesso nas safras de 2019/2020 e 2020/2021 no Cerrado do Piauí.

Para a variável VR, foram ajustados modelos quadráticos em função da aplicação de gesso tanto no primeiro quanto no segundo ano de cultivo (Figura e e Figura11g). Adicionalmente, no segundo ano, foi ajustado um modelo quadrático em função das doses de calcário (Figura f).

As doses de 1 t ha⁻¹ de gesso no primeiro ano resultaram em maior volume de e raiz 60,3 mL e a dose de 2,37 t ha⁻¹ no segundo ano em 40,61mL de raiz. Para a resposta ao gesso, no segundo ano, a aplicação de 11 t ha⁻¹ resultou em maior volume de raiz 45,40 mL.

Para a produtividade foram ajustados modelos sigmóides a fim de explicar o comportamento biológico dos dados. Esses modelos mostraram uma tendência de estabilização da produtividade após a dose de calcário de 10 t ha^{-1} (Figura h e Figura i).

5 DISCUSSÃO

A aplicação de calcário em doses superiores às recomendadas pelos manuais oficiais de correção e fertilização do solo para o Cerrado (Sousa; Lobato, 2004) propiciaram rápida melhoria nos atributos químicos do solo, nas três camadas analisadas. Indicadores químicos considerados essenciais no processo de correção do solo aumentaram na camada 0,0-0,2 m (Ca, Mg, SB e V) com a maior dose de calcário (20 t ha^{-1}), ou foram reduzidos (Al, H+Al, m e micronutrientes catiônicos) já a partir do primeiro ano após aplicação. Especificamente para o Al e m, doses de calcário próximas a 15 t ha^{-1} praticamente neutralizaram por completo a toxidez por este elemento. O aumento do pH do solo resultante da calagem aumenta a concentração e atividade dos íons OH^- em solução, levando à precipitação do Al, tornando-o indisponível (Costa; Crusciol, 2016)

Doses de calcário entre 10 e 15 t ha^{-1} aumentaram as concentrações no solo de P e K, mas doses acima dessa faixa (entre 15 e 20 t ha^{-1}) tenderam a reduzir as concentrações observadas destes elementos e de micronutrientes catiônicos. Tal redução pode levar à deficiência destes nutrientes na planta, com consequente limitação no rendimento de grãos (Opala, 2017). Esta lógica é corroborada pelos resultados da diagnose foliar, que demonstrou redução dos teores de N, P e de micronutrientes na primeira safra, com as maiores doses de calcário. Dessa forma, as elevadas doses de calcário possivelmente resultaram em desbalanço de cátions e de P. O Ca e Mg são cátions que interagem com elementos da solução do solo, competindo por sítios de adsorção, dessa forma precipitando cátions e ânions, dependendo da disponibilidade destes (Nora *et al.*, 2017). A calagem, até certo limite promove o aumento das concentrações de P no solo, devido à redução da adsorção deste aos óxidos de Fe e Al (Auler *et al.*, 2019). No entanto, doses muito altas elevam o pH e podem favorecer a formação de fosfatos de cálcio, resultando na indisponibilidade de P. Isto pode ocorrer mesmo com pH abaixo de 7,0, uma vez que o efeito residual do calcário com o incremento de Ca solúvel (calagem) contribui para a precipitação do P (Penn; Camberato, 2019). A adsorção de P apresenta formato de “U” em relação à escala de pH. Entretanto, quando são considerados os efeitos do pH sobre a disponibilidade de P, deve se levar em conta a taxa de desorção em função do pH e os efeitos deste na taxa de absorção de P pelas raízes das plantas (Barrow; Hartemink, 2023), o que ajuda a explicar a redução dos teores de P no tecido vegetal com as maiores doses de calcário, no primeiro ano de sua aplicação. Assim como o P, os efeitos da

modulação do pH em função da aplicação de calcário, na absorção de nutrientes pelas plantas se aplicam também a outros elementos absorvidos na forma de ânion, como o S.

A redução dos teores de micronutrientes catiônicos pelo aumento do pH é justificada pela complexação ou quelação de Cu, Fe e Mn pelos ácidos húmicos (matéria orgânica) e transformação do Zn em formas não solúveis (Moreira; Moraes; Navroski, 2017). Além disso, pode haver alteração do potencial redox do solo, devido ao revolvimento para a incorporação do calcário e gesso (Auler *et al.*, 2019). Os micronutrientes catiônicos (Cu, Mn e Zn) apresentam maior adsorção em maiores valores de pH, devido à reação com as hidroxilas. Entretanto, este efeito é distinto entre os micronutrientes, como por exemplo o Zn (Barrow; Hartemink, 2023). Quanto ao B, a sua baixa resposta à calagem e gessagem pode ser associada à forma de absorção deste elemento pelas plantas. A forma aplicada (ácido bórico), não possui carga, e, portanto, sofre pouca influência do pH. Além disso, a aplicação de fertilizante à base de B (sulfurgran®) na segunda safra pode ter contribuído para não ocorrência de deficiência deste micronutriente (Barrow; Hartemink, 2023).

O K, por sua vez, pode apresentar redução de sua concentração no solo com a calagem, pelo deslocamento do íon do complexo de troca pelo Ca e Mg, movendo-se no perfil do solo, e podendo ser perdido por lixiviação (Auler *et al.*, 2019). Acredita-se que este mecanismo tenha sido responsável pela redução dos teores deste nutriente nas maiores doses de calcário. Com o aumento do pH do solo há aumento de cargas negativas nas partículas do solo, o que implica em menor proporção de cátions presentes na fase de solução do solo e consequente redução da taxa de movimento para as raízes por difusão (Barrow; Hartemink, 2023).

Na camada 0,2-0,4 m, houve aumentos para a maioria dos atributos químicos do solo nas duas safras (pH, K, Ca, Mg, SB, CTC e V), além de redução do Al, H+Al, m e do Fe com a calagem. Resultados similares foram observados na camada de 0,4-0,6 m. A consistência na redução dos valores dos componentes de acidez e a melhoria do perfil químico do solo nos dois anos agrícolas e em todas as profundidades sugere que após a incorporação do calcário, houve reação uniforme do processo de calagem (Moraes *et al.*, 2023). O incremento da CTC com a calagem se deveu à presença de cargas dependentes de pH, em função da presença do mineral de argila caulinita. A justificativa para esta afirmação é que este mineral está presente na fração argila do solo onde foi realizada a pesquisa e das cargas dependentes de pH que constituem mais de 50% das cargas da superfície deste mineral (Cherian; Arnepalli, 2015; Pragana *et al.*, 2016). Outro aspecto importante, é que o incremento da CTC foi verificado não somente na camada superficial do solo, mas também nas camadas mais profundas, o que ilustra a

importância de uma boa incorporação do corretivo, para melhoria da fertilidade do solo em profundidade.

Há consenso na literatura acerca dos efeitos positivos da aplicação de gesso em ambientes com acidez, na redução dos teores de Al tóxico em subsuperfície e na melhoria do enraizamento e tolerância de plantas em ambientes com possível deficiência hídrica (Tiecher *et al.*, 2018; Pias *et al.*, 2020). Tal constatação é importante, uma vez que a região do Matopiba apresenta elevada variabilidade climática (Reis *et al.*, 2020; Santiago *et al.*, 2022). Muito embora essa região seja caracterizada por estações chuvosas (entre outubro e abril) e secas (entre maio a setembro) bem definidas, o cenário de mudanças climáticas com eventos extremos tende a alterar o padrão, frequência e a distribuição da classe climática, aumentando o risco e o impacto climático na produção agrícola (Aparecido *et al.*, 2023). Dessa forma, o uso do gesso em conjunto com o calcário demonstrou contribuir para acelerar a construção do perfil do solo, conforme verificado na primeira e segunda safra. A construção de um perfil de solo com características químicas favoráveis até a profundidade de 0,6 m promove condições para um melhor ambiente radicular, principalmente devido ao incremento nos teores de Ca e S. A associação entre ambos os nutrientes forma par de íons solúvel com uma valência mais baixa ou carga neutra, favorecendo a mobilidade de Ca e S em profundidade com o incremento de doses de gesso (Costa; Crusciol, 2016).

No ano agrícola 2019/2020, a maior dose de gesso já foi capaz de amenizar a fixação de P e a redução da concentração de K na camada superficial (0,0-0,2 m) do solo. Além disso, elevadas doses de gesso alteraram os teores de Mg no tecido vegetal na primeira safra e de K na segunda safra, ainda que este comportamento não tenha sido observado nos teores do solo. Uma possível redução dos teores de K e Mg no solo em função da aplicação de gesso é justificada pela formação de par iônico destes cátions com o sulfato, proporcionando redução na concentração de ambos em camadas superficiais (Vicensi *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2021). Provavelmente, este efeito foi amenizado pela presença de concentrações consideráveis de Mg no calcário aplicado, e pelas adubações de K, que permitiram a manutenção de teores em níveis considerados adequados para a folha diagnóstica da soja (Oliveira Junior *et al.*, 2020).

Entretanto, a ausência de efeitos da aplicação de gesso na produtividade da soja não era algo esperado, principalmente considerando-se as elevadas concentrações de Al em subsuperfície no solo do presente estudo, e dos efeitos sabidamente positivos da gessagem na redução do Al (Caires; Guimarães, 2018; Vicensi *et al.*, 2020). É possível que a aplicação das doses elevadas de calcário, associada a uma boa incorporação deste ao solo, além da aplicação do superfosfato simples e sulfurgran® (fontes de S), e ausência de déficit hídrico durante os

dois anos de cultivo tenham minimizado um possível efeito positivo do gesso no rendimento da soja. Em revisão sistemática sobre o efeito da aplicação de gesso em ambiente subtropical com subsolo apresentando elevada acidez e deficiência hídrica, observou-se que houve alteração no rendimento de soja em apenas 23% dos casos analisados (Tiecher *et al.*, 2018). Caires, Joris e Churka (2011), estudando os efeitos de longo prazo da adição de calcário e gesso no plantio direto no Sul do Brasil observaram que a produtividade da soja não foi afetada pela aplicação de gesso, em contrapartida, a produtividade do milho foi afetada positivamente com a prática, indicando que a eficiência na absorção de cálcio e a resposta ao gesso podem variar entre as duas culturas. Outros trabalhos relatam que a soja é menos responsiva à aplicação de gesso quando comparada a gramíneas, devido à maior absorção de Ca e à menor dependência de N oriundo do solo, pela soja (Tiecher *et al.*, 2018; Alves *et al.*, 2021).

No ano agrícola 2019/2020, verificou-se que as doses de calcário e gesso influenciaram os valores de Ca, Mg e de Ca^+Mg não trocáveis (calcário residual), sendo que quanto maior a dose, maiores os valores residuais que ainda podem reagir com o solo ao longo do tempo na presença de umidade. Entretanto, no ano agrícola 2020/2021, somente a calagem influenciou as concentrações de Ca, Mg e Ca^+Mg não trocáveis. O efeito do gesso na quantidade de calcário residual no ano agrícola 2019/2020 pode ser justificado pela redução da dissolução do calcário, uma vez que o solo apresenta pH maior na camada superficial (0-0,2 m), onde estes valores foram mensurados (Soratto; Crusciol, 2008). Os dados das quantidades de calcário residual, quando convertidos para percentual de calcário efetivamente reagido (Tabela), demonstraram que houve baixo índice de reação no ano agrícola 2019/2020, quando foi aplicada a dose padrão de 5 t ha^{-1} (51% de calcário residual). A aplicação de calcário promove efeitos residuais significativos nas propriedades químicas do solo, mesmo após oito anos. Esses efeitos incluem a melhoria da acidez do solo, a movimentação de nutrientes para o subsolo ao longo do tempo e a manutenção dos níveis de cálcio (Caires; Joris; Churka, 2011).

Esta informação confirma a hipótese de que doses elevadas de calcário são necessárias para melhorar o ambiente edáfico em condições de pouco tempo disponível para que as reações ocorram, permitindo dessa forma, o cultivo da soja de primeira safra em áreas de abertura. Vale destacar, que o curto tempo disponível para reação do calcário, entre sua aplicação ao solo e a semeadura da soja, é decorrente da curta duração da janela de plantio após o início da estação chuvosa, determinada com base no zoneamento de risco agroclimático (ZARC) para a região (Reis *et al.*, 2020). Dessa forma, o uso de doses de calcário superiores às recomendadas em boletins oficiais é necessário para compensar as diferenças de disponibilidade hídrica entre a região do Matopiba, e as condições predominantes nas regiões onde os dados utilizados nestes

boletins foram gerados. Além disso, boa parte dos manuais de fertilidade ainda em uso, foi produzida com base em pesquisas realizadas nas décadas de 1980 e 1990. Atualmente, são utilizadas cultivares de soja com características e demandas diferentes, sistemas de manejo do solo mais intensivos, associados a uma maior oferta de insumos biológicos e nutricionais. Estas características alteraram a dinâmica da demanda de nutrientes ao longo do tempo, justificando a necessidade de revisão das recomendações oficiais, sobretudo para regiões de fronteira agrícola com condições peculiares. Procedendo-se raciocínio análogo ao de Moraes *et al.* (2023), e considerando-se os resultados da análise de solo nas camadas de 0-0,2 e de 0-0,4 m, a quantidade de calcário necessária para elevar a saturação por bases para 70% (Cantarella *et al.*, 2022) no início do experimento, seria de 3,82 t ha⁻¹ e 5,90 t ha⁻¹ (considerando-se calcário com PRNT de 77,6%), valores estes bastante inferiores àqueles que resultaram nas melhores respostas no presente estudo.

Os dados biométricos (AP, DC, MSPA, MSR e VR) apresentaram resposta significativa com a aplicação de 10 a 15 t ha⁻¹ de calcário no primeiro e segundo ano de cultivo, e de 1 a 2 t ha⁻¹ de gesso, especialmente no segundo ano de cultivo. Isso se deve a uma melhora na fertilidade do solo e no ambiente radicular, onde o aumento no fornecimento de água e nutrientes proporcionado por um solo quimicamente favorável resultam em maior crescimento das plantas e no aumento do potencial produtivo da soja (Bossolani *et al.*, 2021)

O Ca tem função estrutural no desenvolvimento das plantas, sendo um componente essencial da parede celular e exigido em regiões de crescimento devido à sua função na divisão celular. Já o Mg é um constituinte estrutural da clorofila, participa na formação de proteínas, na ativação de enzimas (Rubisco e PEP carboxilase) e na transferência de energia ao compor os substratos ATP-Mg e PPi-Mg (Kerbaudy, 2008).

Em um experimento com aplicação superficial de calcário no sistema de plantio direto, Caires, Joris e Churka (2011) observaram uma resposta significativa na produção de matéria seca da soja em função da calagem, atribuída ao aumento na produção de hastes e vagens. A aplicação de doses superiores às recomendadas cria um ambiente radicular mais favorável ao desenvolvimento das raízes, devido à correção mais acentuada da acidez, ao aumento no suprimento de nutrientes e à maior penetração de calcário e seus produtos de reação no subsolo.

Nolla *et al.* (2020) observaram que, ao aplicar doses de 0, 0,5, 1 e 2 vezes a recomendação de calagem para um solo arenoso, todos os parâmetros de raiz responderam às doses de calcário, sendo que a dose que proporcionou maior desenvolvimento radicular foi de 2 vezes a recomendada, demonstrando uma subestimação da real necessidade de calagem.

A produtividade de grãos de soja foi significativamente aumentada até a dose de 10 t ha⁻¹ de calcário, a partir da qual houve estabilização do rendimento de grãos em ambos os anos agrícolas. Este aumento produtivo esteve associado à melhoria do ambiente edáfico na camada onde há predomínio do desenvolvimento radicular das plantas de soja (Bossolani *et al.*, 2021). A ausência de acréscimo na produtividade em doses acima de 10 t ha⁻¹ de calcário pode ser justificada pelo desbalanço nutricional, conforme verificado para P e K. Os dados do presente estudo sugerem que esta é a dose mais adequada para a abertura de novas áreas com características similares na região do Matopiba, e vai ao encontro das quantidades aplicadas por muitos produtores da região.

O incremento no rendimento de grãos com a dose de 10 t ha⁻¹ foi de 18% e 12% em relação à dose padrão para os anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente. Além disso, caso fosse considerada a recomendação oficial de calcário para a cultura da soja com base no método de saturação por bases, com elevação da saturação (V%) para 50% (Sousa; Lobato, 2004), a dose empregada seria de 2,7 t ha⁻¹, considerando-se a camada de 0-0,2 m e calcário com PRNT de 77,6%. Nessa circunstância, os rendimentos de soja estimados pelos modelos sigmoidais, empregados nos anos agrícolas 2019/2020 e 2020/2021, resultariam em produtividades de grãos de soja 46% e 45% inferiores aos obtidos com o emprego da dose de 10 t ha⁻¹, respectivamente. Portanto, o incremento médio seria de 32% (2019/2020) e 29% (2020/2021). Vale ressaltar que, somente a partir dose de 10 t ha⁻¹ foi possível atingir, no primeiro ano agrícola, a saturação por bases recomendada pelos autores na camada de 0-0,2 m.

Em trabalho avaliando doses de calcário e gesso em área de abertura no Cerrado piauiense (Schenfert *et al.*, 2020) recomendam doses de 8 a 10 t ha⁻¹ para cultivo de soja em primeiro ano. Entretanto, os autores mencionam que para a obtenção de produtividades satisfatórias no segundo ano (2.700 kg ha⁻¹), são necessárias doses de calcário superiores a 6,3 t ha⁻¹, em sistema de plantio direto. Os autores mencionam ainda, que o gesso proporcionou aumento na produtividade da soja, considerando duas safras com quantidade limitada de chuva (2015/2016) e com distribuição irregular das chuvas (2016/2017).

Em levantamento de informações sobre o manejo da fertilidade do solo no oeste da Bahia, os consultores e produtores de grãos e fibras procedem à análise de solo, mas, na prática, não usam tais análises para calcular a dose de calcário, gesso e fertilizantes. Nessa região, os solos apresentam uma composição majoritariamente arenosa, sendo recomendadas aplicações de 3 e 1 tonelada por hectare de calcário e gesso, respectivamente, para atender os critérios das recomendações oficiais. Na prática, no entanto, os produtores frequentemente utilizam doses superiores a 5-7 t ha⁻¹ de calcário (Santos *et al.*, 2018).

O uso de altas doses, portanto, garante uma correção imediata da acidez do solo, permitindo o cultivo da soja em primeiro ano, uma vez que uma reação de 20 a 40% do calcário aplicado em doses elevadas equivale à quantidade necessária para correção da acidez do solo na ordem de grandeza das recomendações pelos critérios oficiais, e garante uma fertilidade do solo adequada para a cultura da soja e maiores produtividades no primeiro ano (Lustosa Filho *et al.*, 2021).

6 CONCLUSÃO

As doses de calcário para alta produtividade de grãos de soja em áreas de primeira safra na região do Matopiba não devem exceder 10 t ha^{-1} ou até o dobro do valor recomendado por métodos padrão ou manuais oficiais de recomendação. Doses elevadas de calcário ($>10 \text{ t ha}^{-1}$) proporcionam redução nas concentrações de P, K e micronutrientes catiônicos no solo, resultando em reduções nos teores foliares de macro e micronutrientes nas plantas de soja. O uso combinado de gesso e calcário em áreas recentemente convertidas do Cerrado para o cultivo de soja proporciona uma rápida melhoria química no perfil do solo, com a redução dos componentes de acidez. A aplicação de calcário na dose de 10 t ha^{-1} é uma prática viável para melhorar o ambiente do solo na região do Matopiba devido ao curto tempo disponível para as reações químicas ocorrerem, permitindo o cultivo de soja em áreas do Cerrado recentemente convertidas para a agricultura.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. LEONARDO MORAES; SPAROVEK, GERD Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, L. A.; TIECHER, T. L.; FLORES, J. P. M.; FILIPPI, D.; GATIBONI, L. C.; BAYER, C.; PIAS, O. H. C.; MARQUEZ, A. A.; BORDIGNON, V.; GOULART, R. Z.; TIECHER, T. Soil chemical properties and crop response to gypsum and limestone on a coarse-textured Ultisol under no-till in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma Regional**, v. 25, e00372, 2021.
- APARECIDO, L. E. O.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇONE, J. A.; LEITE, M. R. L. Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 1-2, p. 87-100, 2023.
- ATHANASE, N.; VICKY, A.; JAYNE, M.; SYLVESTRE, H. Soil acidification and lime quality: sources of soil acidity, its effects on plant nutrients, efficiency of lime and liming requirements. **Environmental Science, Agricultural and Food Sciences**, v. 2, n. 4, p. 1-34, 2013.
- AULER, A. C.; CAIRES, E. F.; PIRES, L. F.; GALETTO, S. L.; ROMANIW, J.; CHARNOBAY, A. C. Lime effects in a no-tillage system on Inceptisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00206, 2019.
- BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1-2, p. 21-37, 2023.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALO, J. R. **Métodos de análise química de plantas Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. 48 p. (Boletim Técnico nº 78).
- BESSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; NETO, M. E.; MINATO, E. A.; CONEGLIAN, C. F.; KACHINSKI, W. D.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Lime and phosphogypsum application management: changes in soil acidity, sulfur availability and crop yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0200135, 2021.
- BOHN, N. P.; LUSTOSA FILHO, J. F.; NÓBREGA, J. C. A.; CAMPOS, A. R.; NÓBREGA, R. S. A.; PACHECO, L. P. Identificação de cultivares de soja para a região sudoeste do Cerrado piauiense. **Revista Agro@Mambiente On-Line**, v. 10, n. 1, p. 10-16, 2016.
- BONFIM-SILVA, E. M.; GUIMARÃES, S. L.; FARIAS, L. N.; OLIVEIRA, J. R.; BOSA, K. C.; FONTENELLI, J. V.; Phosphorus fertilization on the development and production of pigeonpea in the Cerrado oxisol in first cultivation. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1380-1388, 2014.
- BORTOLUZZI, E. C.; GARIBOTTI, A.; TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; MOTERLE, D. F.; FIORIN, J. E. Revisiting limestone quality for soil liming purpose. **Minerals**, v. 12, p. 1522, 2022.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; PORTUGAL, J. R.; MORETTI, L. G.; GARCIA, A.; RODRIGUES, V. A.; FONSECA, M. C.; BERNART, L.; VILELA, R. G.; MENDONÇA, L. P.; REIS, A. R. Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **European Journal of Agronomy**, v. 128, n. 1, p. 126308, 2021.

CAIRES, E. F.; CHUEIR, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 27-34, 1998.

CAIRES, E.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1-9, 2018.

CAIRES, E.; 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, p. 45-53, 2011.

CANTARELLA, H.; MATTOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; QUAGGIO J. A.; VAN RAIJ, B. **Boletim 100 - Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022. 500 p.

CARNEIRO, J. S. S.; SOUSA, S. A.; NIKKEL, M.; DEUSDARÁ, T. T.; MACHADO, A. F.; SILVA, R. R. Supercalagem: alterações em atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 16, n. 1, p. 31-38, 2018.

CHEN, C.; XIAO, W.; CHEN, H. Y. H. Mapping global soil acidification under N deposition. **Global Change Biology**, v. 29, n. 16, p. 4652-4661, 2023.

CHERIAN, C.; ARNEPALLI, D. N. A Critical appraisal of the role of clay mineralogy in lime stabilization. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 1, n. 1, p. 1-20, 2015.

CONAB. **Produção nacional de grãos é estimada em 312,2 milhões de toneladas na safra 2022/23**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4971-producao-de-graos-esta-estimada-em-312-5-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23>>. Acesso em: 26 jul. 2023.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, safra 2023/24**. 9. ed. Brasília, DF, 2024.

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

CARVALHO, L. A.; NETO, V. J. M.; SILVA, L. F.; PEREIRA, J. G.; NUNES, W. A. G. A.; CHAVES, C. H. C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante - MS. **Agrarian**, v. 1, n. 2, p. 7-22, 2008.

DEVI, M. M.; BHATTACHARYYA, D.; DAS, K. N.; DEVI, K. D. Distribution study of the different forms of soil acidity and available nutrients in Upper Brahmaputra Valley Zone

(UBVZ) of Assam. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 18, p. 634-643, 2023.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

ELIAS, F.; MARIMON JUNIOR, B. H.; OLIVEIRA, F. J. M.; OLIVEIRA, J. C. A.; MARIMON, B. S. Soil and topographic variation as a key factor driving the distribution of tree flora in the Amazonia/Cerrado transition. **Acta Oecologica**, v. 100, p. 103467, 2019.

EVANGELISTA, B. A.; SILVA, F. A. M.; SIMON, J. **Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região MATOPIBA**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2017. 44 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, 2001.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian Cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 3-4, p. 223-241, 1999.

HUSSAIN, R. M.; ALI, M.; FENG, X.; LI, X. The essence of NAC gene family to the cultivation of drought-resistant soybean (*Glycine max* L. Merr.) cultivars. **BMC Plant Biology**, v. 17, n. 1, p. 55, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa>>. Acesso em: 26 jul. 2023.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 413 p.

LI, Y.; CUI, S.; CHANG, S. X.; ZHANG, Q. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 3, p. 1393-1406, 2019.

LIMA, M. G.; MORAES, A. M.; NUNES, L. A. P. L.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Climas do Piauí: interações com o Ambiente**. Teresina: edufpi, 2020. 144 p.

LIMA, M.; SILVA JUNIOR, C. A.; RAUSCH, L.; GIBBS, H. K.; JOHANN, J. A. Demystifying sustainable soy in Brazil. **Land Use Policy**, v. 82, p. 349352, 2019.

LIU, M.; KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L.; VENDRELL, P. F. Soil lime requirement by direct titration with a single addition of calcium hydroxide. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 2, p. 522-530, 2005.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F.; BARROS, A. H. C.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. O.; SILVEIRA, H. L. F.; QUARTAROLI, C. F.; ALMEIDA, R. E. M.; FREITAS, P. L. **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. Embrapa Solos. 2015. 48 p. (Documentos, 179).

LUSTOSA FILHO, J. F.; SOUZA, H. A.; ALMEIDA, R. E. M.; LEITE, L. F. C. Conservação e manejo da fertilidade do solo no Cerrado do Matopiba. In: IWATA, B. F.; ROCHA, I. L. (ed.). **Cerrado: capital natural e serviços ambientais**. Jundiaí: Paco Editorial, 2021. p. 75-97.

MOORE, G. A. **Soil Guide: A handbook for understanding and managing agricultural soils**. Australia: Department of Agriculture, 2004. 381 p.

MORAES, F. A.; MOREIRA, S. G.; PEIXOTO, D. S.; SILVA, J. C. R.; MACEDO, J. R.; SILVA, M. M.; SILVA, B. M.; SANCHEZ, P. A.; NUNES, M. R. 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. 126763, 2023.

MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; NAVROSKI, D. Lime and micronutrients interaction in soybean genotypes adapted to tropical and subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 7, p. 792-800, 2017.

MÜLLER, M.; SCHNEIDER, J. R.; KLEIN, V. A.; SILVA JÚNIOR, J. P.; CHAVARRIA, G. Root growth and crop performance of soybean under chemical, physical, and biological changes after subsoiling. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 932-947, 2020.

NAIR, K. M.; KUMAR, K. S. A.; LALITHA, M.; SHIVANAND.; KUMAR, S. C. R., SRINIVAS, S.; KOYAL, A.; PARVATHY, S.; SUJATHA, K.; THAMBAN, C.; MATHEW, J.; CHANDRAN, K. P.; HARIS, A.; KRISHNAKUMAR, V.; SRINIVASAN, V.; JACOB, J.; NAGARAJ, J. S.; D'SOUZA, m. v.; RAGHURAMULU, Y.; HEGDE, R.; SINGH, S. K. Surface soil and subsoil acidity in natural and managed land-use systems in the humid tropics of Peninsular India. **Current Science**, v. 116, n. 7, p. 1201-1211, 2019.

NDUWUMUREMYI, A. Soil acidification and lime quality: sources of soil acidity, effects on plant nutrients, efficiency of lime and liming requirements. **Journal of Agriculture and Allied Sciences**, v. 2, p. 26-34, 2013.

NOLLA, A.; ALVES, E. O.; SILVA, T. G.; BORDIN, A. V. Correction of soil acidity and availability of phosphorus and potassium in an oxisol submitted to surfaced and incorporated liming. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2478-2487, 2020.

NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; GRUHN; E. M. Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0160504, 2017.

NOVAIS, R. F. D.; BARROS, N. F. D.; ALVAREZ, V. H. **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 909 p.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT

JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 133-184.

OPALA, P. A. Influence of lime and phosphorus application rates on growth of maize in an acid soil. **Advances in Agriculture**, v. 2017, p. 1-5, 2017.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019. 289 p.

PAVAN, M. A. Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais. **Informações Agronômicas**, v. 35, p. 1-2, 1986.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 1-18, 2019.

PIAS, O. H. D. C.; PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, A. G. B.; BAYER, C. Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 675-692, 2020.

PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L. J. C.; COSTA, M. H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R. J. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286-298, 2016.

PRAGANA, R. B.; SOUZA JUNIOR, V. S.; MOURA, R. S.; SOARES, J. M. Characterization of Yellow Latosols (Oxisols) of Serra do Quilombo, in Piauí state, Savanna Woodlands - Brazil. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 4, p. 832-840, 2016.

QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Agronomic efficiency of limestones with different acid-neutralizing capacity, under field condition. In: DATE, R. A.; GRUNDON, N. J.; RAYMENT, G. E.; PROBERT, M. E. (ed.). **Plant-soil interactions at low pH: Principles and management**. Developments in plant and soil sciences, Dordrecht Springer. 1995. 49-496 p.

RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; CAMARGO, A. P.; SOARES, E. Perdas de cálcio e magnésio durante cinco anos em ensaio de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 33-37, 1982.

RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 284 p.

REIS, L. C.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G.; MUTTI, P. R.; SPYRIDES, M. H. C.; SILVA, P. E. Analysis of climate extreme indices in the MATOPIBA region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 177, n. 9, p. 4457-4478, 2020.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a brazilian Savannah oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, 1980.

SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.

SANTIAGO, D. B, BARBOSA, H. A, CORREIA FILHO, W. L. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Interactions of environmental variables and water use efficiency in the Matopiba Region via multivariate analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 14, p. 8758, 2022.

SANTOS, F. C.; MENDES, S. M.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; PASSOS, A. M. A.; RESENDE, R. M. S.; PESSOA, S. T.; PIMENTEL, M. A. G.; OLIVEIRA, I. R.; RODRIGUES, J. A. S.; CHAVES, F. F.; BORGHI, E.; LANDAU, E. C.; COTA, L. V.; RESENDE, A. V.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; GUIMARAES, D. P.; VIANA, P. A.; KARAM, D.; NOCE, M. A.; FIGUEIREDO, A. B. A.; BRANDAO, A. L. **A agropecuária do sul do Matopiba em perspectiva: Circuito solos arenosos da região Cocos-Jaborandi**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 67 p. (Documentos, 222)

SÁVIO, F. L.; SILVA, G.; TEIXEIRA, I. R.; MOTA, J. H.; BORÉM, A. Calagem e gessagem na nutrição e produção de soja em solo com pastagem degradada. **Revista Agrotecnologia**, v. 2, n. 1, p. 19-31, 2011.

SCHENFERT, T. A., RATKE, R. F., CASARIN, V., BARBOSA, J. M., CHAVES, D. V., HOLANDA NETO, M. R.; ROQUE, C. G.; CARLOS, H. C. V. Lime and gypsum in the implantation no-till system promote the nutrition and yield of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 5, p. 641-654, 2020.

SCHMIDT, F.; TOMELERO, V.; BONA, F. D. Gesso agrícola e calcário aplicados no sistema de plantio direto com e sem revolvimento do solo. **Agropecuária Catarinense**, v. 29, n. 1, p. 86-93, 2016.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M. Produtividade da soja na região de Matopiba sob mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 8-14, 2019.

SOBKO, O.; ZIKELI, S.; CLAUPEIN, W.; GRUBER, S. Seed yield, seed protein, oil content, and agronomic characteristics of soybean (*Glycine max* L. Merrill) depending on different seeding systems and cultivars in Germany. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 1020, 2020.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um Latossolo submetido à aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 663-673, 2008.

SOUSA, D. M. G. D.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados. 2004. 416 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão, 2017. 574 p.

TIECHER, T.; PIAS, O. H. C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. O.; ANGHINONI, I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-17, 2018.

VALDES, C.; GILLESPIE, J.; DOHLMAN, E. **Soybean production, marketing costs, and export competitiveness in Brazil and the United States**. Washington: Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. 2023. Disponível em: <<https://handle.nal.usda.gov/10113/8142532>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

VICENSI, M.; LOPES, C.; KOSZALKA, V.; UMBURANAS, R. C.; KAWAKAMI, J.; POTT, C. A.; MÜLLER, M. M. L. Gypsum rates and splitting under no-till: soil fertility, corn performance, accumulated yield and profits. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 690-702, 2020.

WANG, Y.; YAO, Z.; ZHAN, Y.; ZHENG, X.; ZHOU, M.; YAN, G.; WANG, L.; WERNER, C.; BUTTERBACH-BAHL, K. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. **Global Change Biology**, v. 27, n. 12, p. 2807-2821, 2021.

XIONG, R.; LIU, S.; CONSIDINE, M. J.; SIDDIQUE, K. H. M.; LAM, H. M.; CHEN, Y. Root system architecture, physiological and transcriptional traits of soybean (*Glycine max* L.) in response to water deficit: A review. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 405-418, 2021.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Tropical agricultural research**, v. 45, p. 128-137, 2015.

ZHENG, S. J. Crop production on acidic soils: overcoming aluminium toxicity and phosphorus deficiency. **Annals of Botany**, v. 106, n. 1, p. 183-184, 2010.