



**JOSIAS REIS FLAUSINO GAUDENCIO**

**FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, DISPONIBILIDADE DE  
NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS  
EM FUNÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO INCORPORADAS A  
0,40 M DE PROFUNDIDADE**

**LAVRAS - MG  
2024**

**JOSIAS REIS FLAUSINO GAUDENCIO**

**FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E  
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS EM FUNÇÃO DE DOSES DE  
CALCÁRIO INCORPORADAS A 0,40 M DE PROFUNDIDADE**

Dissertação de mestrado apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Programa de Pós-Graduação  
em Agronomia/Fitotecnia, área de  
concentração em Produção Vegetal, para a  
obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Lopes  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Gaudencio, Josias Reis Flausino.

Formas de alumínio no solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de culturas anuais em função de doses de calcário incorporadas a 0,40 m de profundidade / Josias Reis Flausino Gaudencio. - 2024.

136 p.

Orientador(a): Silvino Guimarães Moreira.

Coorientador(a): Guilherme Lopes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Calagem. 2. Construção da fertilidade do solo. 3. Produtividade de culturas anuais. I. Moreira, Silvino Guimarães. II. Lopes, Guilherme. III. Título.

**JOSIAS REIS FLAUSINO GAUDENCIO**

**FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E  
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS EM FUNÇÃO DE DOSES DE  
CALCÁRIO INCORPORADAS A 0,40 M DE PROFUNDIDADE**

**SOIL ALUMINIUM FORMS, AVAILABILITY OF NUTRIENTS AND YIELD OF  
ANNUAL CROPS AS A FUNCTION OF LIME RATES INCORPORATED AT 0.40 M  
DEPTH**

Dissertação de mestrado apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Programa de Pós-Graduação  
em Agronomia/Fitotecnia, área de  
concentração em Produção Vegetal, para a  
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de fevereiro de 2024

Dr. Marcelo Augusto Batista      UEM

Dr. Devison Souza Peixoto      Rehagro

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Lopes  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2024**

*À minha família, em especial minha mãe Neuza, meu pai Milton (in memoriam) e minhas irmãs Cleide, Neide, Nelma, Eneida e Neiva, pelo amor, apoio e ensinamentos ao longo de toda minha vida.*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, saúde, disposição e coragem, pela família e amigos, pelo pão de cada dia e pela oportunidade de me levantar todas as manhãs e ter condições de ser um pouco melhor que ontem.

Ao professor Silvino Moreira, pela orientação na condução dos experimentos e escrita desse trabalho; pela confiança depositada, em função da responsabilidade e a importância que esse projeto tem, e pelo conhecimento compartilhado ao longo de todos esses anos de trabalho juntos.

Ao professor Guilherme Lopes, por aceitar me coorientar no mestrado, por ceder a estrutura do laboratório e pelas sugestões nas metodologias das análises.

À Universidade Federal de Lavras e o Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia pelo ensino ofertado e por toda a estrutura disponibilizada nos Departamentos de Agricultura (DAG) e Ciência do Solo (DCS).

À Associação dos Mineradores de Pains, Arcos e Região (AMPAR) e as empresas BRISSELO, CAZANGA, GECAL e SOLO FÉRTIL pelos recursos financeiros destinados ao projeto e pela parceria séria, com compromisso pelos resultados com validação científica.

Aos produtores, responsáveis técnicos e demais funcionários vinculados às fazendas que contribuíram com esse projeto: Laerte e Alex (Fazenda Palma da Babilônia), Antônio (Fazenda Fundão), Douglas e João Marcos (Fazenda Curtume) e Rodrigo, Júnior, Thiago e Paulo (Fazenda Massaroca).

Aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Marcelo Augusto Batista e Dr. Devison Souza Peixoto, por aceitarem o convite em participar da banca e, de antemão, pelas contribuições para o formato final desse trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa em Manejo de Produção (GMAP) por todo apoio durante as atividades que envolveram desde a marcação dos experimentos, passando pelas coletas de folhas, colheitas e avaliações de produtividade e componentes, até as árduas amostragens de solos. Como são tantas pessoas envolvidas nas atividades pelo grupo, seria arriscado de minha parte citar nomes, pois poderia cometer a injustiça de não me lembrar de todos. Então, dessa forma, sintam-se todos cumprimentados em nome do GMAP.

Aos amigos ex-membros do Gmap: Flávio, Júnior, Hugo, Mateus Marques, Matusalem, Alessandro, Otávio, Vitor Hugo. Essas pessoas estiveram diretamente ligadas com a implantação e condução dos primeiros resultados desses experimentos.

Agradeço a Larissa, que me acompanhou durante boa parte desse tempo e que também me trouxe muitas sugestões na formatação final desse material.

Agradeço também o Francisco Hélcio pelo suporte em relação às amostras de solos, ao Leônidas pela ajuda com a metodologia, à Geila por ceder o espaço e materiais do laboratório e à Lívia pelas determinações feitas no ICP-OES.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

**MUITO OBRIGADO!**

*“E Conheceis a verdade, e a verdade vos libertará.” (João 8:32)*

*“Se você não tem sequer a coragem de enxergar a realidade, como pode ter a pretensão de mudá-la?” (Olavo de Carvalho)*

## RESUMO

Estudos recentes têm mostrado a importância da correção mais profunda do solo (0 a 0,40 m) no aumento da produtividade, bem como na resiliência das culturas aos déficits hídricos. Contudo, as doses ótimas de calcário têm sido muito superiores às obtidas pela multiplicação dos valores calculados para a camada de 0 a 0,20 m por dois, como é sugerido nos boletins de recomendação. Assim, objetivou-se no presente estudo avaliar os efeitos da incorporação de doses elevadas de calcário até 0,40 m de profundidade na disponibilidade de nutrientes e na produtividade de grãos, além de avaliar os efeitos da calagem na correção da acidez e nas formas de Al trocável ( $Al_{KCl}$ ), Al associado à MO ( $Al_{CuCl_2 - KCl}$ ) e a relação destas formas de Al com a produtividade das culturas. Os experimentos foram conduzidos de forma independente, em DBC com quatro repetições, nas cidades de Uberlândia (Local 1), Araguari (Local 2), São João del Rei (Local 3) e Formiga (Local 4), em solos com textura franco-arenosa a muito argilosa. Os tratamentos foram compostos por seis doses de calcário (0,0; 4,0; 8,0; 12,0; 16,0 e 20,0 Mg ha<sup>-1</sup>) nos locais 1, 2 e 3 e por oito doses de calcário no Local 4 (0,0; 4,0; 8,0; 12,0; 16,0; 20,0; 24,0 e 28,0 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporadas a 0,40 m. No primeiro estudo (artigo 1), a calagem aumentou o pH e reduziu a H<sup>+</sup>Al nas diferentes profundidades dos solos de todos os locais. Os maiores aumentos de pH (pH >7,0) ocorreram nos locais 1 e 3. Os teores de  $Al_{KCl}$  foram maiores nos locais 2 e 4 e foram reduzidos com o aumento de pH. Da mesma forma, os teores de  $Al_{CuCl_2}$  e  $Al_{(CuCl_2 - KCl)}$  foram inversamente relacionados com a elevação de pH. A observação de maiores valores de pH em solos que apresentaram naturalmente os menores teores de  $Al_{CuCl_2}$  e também a relação positiva entre essas quantidades de  $Al_{CuCl_2}$  e H<sup>+</sup>Al indicaram que essas formas podem estar associadas ao tamponamento de pH nesses solos. A calagem incrementou a produtividade acumulada, sendo as máximas obtidas com as doses de 13,2 (Local 1), 17,1 (Local 2) e 18,7 Mg ha<sup>-1</sup> (Local 4). No segundo estudo (artigo 2), realizado no Local 3, a calagem influenciou positivamente os valores de pH e V % e teores de Ca e Mg. No solo, somente foram observadas reduções de Fe nos dois primeiros anos e de B no segundo ano de avaliação. As reduções nas concentrações foliares foram observadas para Fe na soja e milho, enquanto B e Mn foram reduzidos apenas na leguminosa, sem prejuízos à nutrição da cultura. A produtividade da soja, cultivada sob estresse hídrico, foi incrementada pelas doses de calcário, sendo a máxima na dose estimada de 15 Mg ha<sup>-1</sup>. Por sua vez, a produtividade de milho, em dois cultivos com altos volumes de precipitação acumulada, não foram influenciados pela calagem.

**Palavras-chave:** Tamponamento do solo. Abertura de novas áreas. Construção do perfil do solo. Culturas anuais. Sistema de produção.

## ABSTRACT

Recent studies have shown the importance of deeper soil correction (0 to 0.40 m) in increasing productivity, as well as in crop resilience to water deficits. However, the optimal limestone doses have been much higher than those obtained by multiplying the values calculated for the 0 to 0.20 m layer by two, as suggested in the recommendation bulletins. Thus, the objective of this study was to evaluate the effects of incorporating high doses of limestone up to 0.40 m in depth on nutrient availability and grain productivity, in addition to evaluating the effects of liming on acidity correction and on the forms of exchangeable Al (AlKCl), Al associated with OM (AlCuCl<sub>2</sub> - KCl) and the relationship of these forms of Al with crop productivity. The experiments were conducted independently, in DBC with four replicates, in the cities of Uberlândia (Site 1), Araguari (Site 2), São João del Rei (Site 3) and Formiga (Site 4), in soils with sandy loam to very clayey texture. The treatments consisted of six limestone rates (0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0 and 20.0 Mg ha<sup>-1</sup>) at sites 1, 2 and 3 and eight limestone rates at Site 4 (0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0, 20.0, 24.0 and 28.0 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporated at 0.40 m. In the first study (article 1), liming increased pH and reduced H<sup>+</sup>Al at different soil depths at all sites. The largest increases in pH (pH >7.0) occurred at sites 1 and 3. AlKCl levels were higher at sites 2 and 4 and decreased with increasing pH. Likewise, AlCuCl<sub>2</sub> and Al (CuCl<sub>2</sub> - KCl) levels were inversely related to increasing pH. The observation of higher pH values in soils that naturally presented the lowest AlCuCl<sub>2</sub> levels and also the positive relationship between these amounts of AlCuCl<sub>2</sub> and H<sup>+</sup>Al indicated that these forms may be associated with pH buffering in these soils. Liming increased accumulated productivity, with maximum yields obtained with doses of 13.2 (Site 1), 17.1 (Site 2) and 18.7 Mg ha<sup>-1</sup> (Site 4). In the second study (article 2), carried out at Site 3, liming positively influenced pH and V% values and Ca and Mg levels. In the soil, reductions were only observed in Fe in the first two years and in B in the second year of evaluation. Reductions in foliar concentrations were observed for Fe in soybean and corn, while B and Mn were reduced only in legumes, without harming crop nutrition. Soybean productivity, grown under water stress, was increased by lime rates, with the maximum at the estimated rate of 15 Mg ha<sup>-1</sup>. In turn, corn productivity, in two crops with high volumes of accumulated precipitation, was not influenced by liming.

**Keywords:** Soil buffering. Opening of new areas. Construction of the soil profile. Annual crops. Production system.

## INDICADORES DE IMPACTO

Os resultados deste estudo revelam uma nova abordagem no contexto da calagem para culturas anuais em sistemas de produção de grãos e geram impacto significativo no desenvolvimento de sistemas agrícolas resilientes e sustentáveis. No trabalho, são destacados pontos importantes como a necessidade de reavaliação das metodologias de recomendação de doses de calcário, afim de alcançar níveis adequados de nutrientes no solo de maneira eficiente. A discussão envolve aspectos ligados à subestimativa de doses e o efeito da calagem sobre a disponibilidade de nutrientes no solo e o estado nutricional das plantas. Por fim, os resultados de rendimento de grãos mostram tendência clara e positiva ao uso de maiores doses de corretivos. Com enfoque extensionista, o projeto integrou academia, setor produtivo e sociedade, envolvendo empresas de mineração e produção de corretivos agrícolas, produtores rurais das mesoregiões mineiras do Campo das Vertentes, Oeste de Minas e Triângulo Mineiro, mais de 20 estudantes de graduação, 7 estudantes de pós-graduação e 2 professores da UFLA. Alinhado às áreas temáticas de Meio Ambiente e Tecnologia e Produção, o estudo promove a sustentabilidade agrícola, contribuindo para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), a partir do uso da calagem que otimiza a produção agrícola, melhora a eficiência de insumos e aumenta a produtividade das lavouras. Assim, este trabalho integra conhecimento técnico-científico e práticas agrícolas inovadoras, reforçando a conexão entre ensino, pesquisa e extensão para responder a desafios agronômicos, econômicos e ambientais da produção de grãos. Dessa forma, os resultados desse trabalho podem beneficiar direta e indiretamente todos os agentes da cadeia produtiva de alimentos, principalmente consultores e produtores, mas também o consumidor final, com acesso a alimentos de qualidade e mais acessíveis.

## IMPACT INDICATORS

The results of this study reveal a new approach in the context of liming for annual crops in grain production systems and generate a significant impact on the development of resilient and sustainable agricultural systems. The work highlights important points such as the need to reassess methodologies for recommending lime doses in order to achieve adequate levels of nutrients in the soil efficiently. The discussion involves aspects related to the underestimation of doses and the effect of liming on the availability of nutrients in the soil and the nutritional status of plants. Finally, the grain yield results show a clear and positive trend towards the use of higher doses of correctives. With an extensionist focus, the project integrated academia, the productive sector and society, involving mining companies and producers of agricultural correctives, rural producers from the Minas Gerais mesoregions of Campo das Vertentes, Oeste de Minas and Triângulo Mineiro, more than 20 undergraduate students, 7 graduate students and 2 professors from UFLA. Aligned with the thematic areas of Environment and Technology and Production, the study promotes agricultural sustainability, contributing to the UN Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 12 (Responsible Consumption and Production) and SDG 13 (Climate Action), through the use of liming that optimizes agricultural production, improves input efficiency and increases crop productivity. Thus, this work integrates technical-scientific knowledge and innovative agricultural practices, reinforcing the connection between teaching, research and extension to respond to agronomic, economic and environmental challenges of grain production. In this way, the results of this work can directly and indirectly benefit all agents in the food production chain, mainly consultants and producers, but also the end consumer, with access to quality and more affordable food.

## LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 - EFEITOS DA CALAGEM INCORPORADA A 40 CM DE PROFUNDIDADE NAS FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, ACIDEZ POTENCIAL E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS.....	41
Figura 1 - Localização dos municípios de condução dos experimentos.....	43
Figura 2 - Precipitação acumulada entre a instalação do experimento e a amostragem de solo. .....	44
Figura 3 - Valores de pH e H+Al em função das doses de calcário, em diferentes locais. ....	58
Figura 4 - Teores de alumínio extraídos em KCl (AlKCl), saturação por alumínio (m%), alumínio extraído em CuCl <sub>2</sub> (AlCuCl <sub>2</sub> ) e alumínio não trocável (AlCuCl <sub>2</sub> – AlKCl), em função de doses de calcário nos diferentes locais.....	59
Figura 5 - Quantidades extraídas de alumínio em CuCl <sub>2</sub> e KCl em função do pH do solo, nos diferentes locais. ....	63
Figura 6 - Relação entre as quantidades de alumínio extraídas em CuCl <sub>2</sub> e os teores de H+Al estimadas pelo método SMP, nos diferentes locais.....	64
Figura 7 - Relação entre os teores de alumínio não trocável e matéria orgânica dos solos dos diferentes locais. ....	65
Figura 8 - Produtividade acumulada de grãos dos três anos agrícolas nos quatro locais, em função das doses de calcário incorporadas 0-0,40 m.....	67
ARTIGO 2 - EFEITOS DA CALAGEM SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO. ....	84
Figura 1 – Mapa de localização do município e da área experimental.....	94
Figura 2 - Dados de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima entre os meses de dezembro de 2018 e agosto de 2023 em São João Del Rei – MG.....	95
Figura 3 - Balanço hídrico das culturas de soja e milho nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23.....	101
Figura 4 - Valores de pH, Ca, Mg e V% nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, em função de doses de calcário, entre os anos de 2020 a 2023. ....	103
Figura 5 - Efeito das doses de calcário nas produtividades de soja e milho.....	109
Figura 6 - Matriz de correlação de Spearman entre o pH, os teores de micronutrientes no solo, concentrações no tecido vegetal e a produtividade da soja na safra 2020/21.....	110

Figura 7 - Matriz de correlação de Spearman o pH, os teores de micronutrientes no solo, concentrações no tecido vegetal e a produtividade do milho na safra 2021/22. ... 111

## LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 - EFEITOS DA CALAGEM INCORPORADA A 40 CM DE PROFUNDIDADE NAS FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, ACIDEZ POTENCIAL E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS.....	41
Tabela 1 - Propriedades químicas dos solos antes da instalação dos experimentos.....	50
Tabela 2 - Distribuição percentual das frações silte, argila e areia e a classificação textural dos solos do experimento. ....	51
Tabela 3 - Características químicas e granulométricas dos calcários utilizados. ....	52
Tabela 4 - Informações das culturas, datas de plantio e colheita e histórico de adubações nos locais dos experimentos.....	54
Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre os atributos químicos do solo e a produtividade relativa de diferentes culturas nas diferentes safras e locais estudados. ....	66
Tabela 6 - Doses de calcário ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) calculadas para elevação da saturação por bases a 70 % pelo Método de São Paulo <sup>1</sup> (RAIJ et al., 1997) e pelo método de neutralização de Al e incremento de Ca e Mg - Método de Minas Gerais <sup>2</sup> (ALVAREZ et al., 1999), e a dose para máxima produtividade acumulada obtida no presente estudo. ....	68
ARTIGO 2 - EFEITOS DA CALAGEM SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO. ....	84
Tabela 1 - Propriedades químicas do solo antes da implantação do experimento. ....	95
Tabela 2 - Dados referentes aos cultivos de soja e milho entre os anos de 2019 e 2023. ....	99
Tabela 3 - Efeitos das doses de calcário sobre os teores de micronutrientes no solo.....	105
Tabela 4 - Concentração de macronutrientes no tecido foliar das culturas de soja e milho em função das doses de calcário.....	107
Tabela 5 - Concentrações de micronutrientes no tecido foliar das culturas de soja e milho em função das doses de calcário.....	108

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL .....	17
2.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	20
2.1	Correção da acidez do solo e disponibilidade de nutrientes .....	20
2.2	Necessidade de Calagem .....	23
2.3	Alumínio no solo .....	26
2.3.1	Formas de alumínio no solo .....	26
2.3.2	Fracionamento de Al no solo e implicações práticas .....	28
	<b>ARTIGO 1 - EFEITOS DA CALAGEM INCORPORADA A 40 CM DE PROFUNDIDADE NAS FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, ACIDEZ POTENCIAL E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS.....</b>	<b>38</b>
1.	INTRODUÇÃO .....	40
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2.1	Caracterização geográfica e climática dos locais dos experimentos .....	43
2.2	Caracterização dos solos .....	44
2.3	Delineamento experimental e condução .....	51
2.4	Coleta e Análises de solos.....	56
2.5	Análise dos dados.....	57
3.	RESULTADOS.....	58
3.1	Acidez ativa e acidez potencial dos solos .....	58
3.2	Efeito da calagem sobre o alumínio trocável e não trocável.....	59
3.3	Interação dos atributos químicos do solo e a produtividade das culturas .....	65
4.	DISCUSSÃO .....	69
4.1	Efeito das doses de calcário nos atributos químicos do solo.....	69
4.2	Alumínio extraído em $\text{CuCl}_2$ e o tamponamento do solo .....	70
4.3	Efeitos da correção do solo sobre o rendimento das culturas.....	73
5.	CONCLUSÃO .....	77
	REFERÊNCIAS .....	78
	APÊNDICE A – Modelo estatístico das variáveis avaliadas no presente estudo, conforme a indicação do atributo.....	84
	<b>ARTIGO 2 - EFEITOS DA CALAGEM SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO.....</b>	<b>89</b>
1.	INTRODUÇÃO .....	91
2.	MATERIAL E MÉTODOS .....	94
2.1	Caracterização da área: localização, clima e solo.....	94
2.2	Caracterização e condução do experimento.....	96
2.3	Condução das culturas .....	97
2.4	Análise de folhas e produtividade .....	97
2.5	Análises de solos.....	97

2.6	Análise dos dados.....	98
3.	RESULTADOS .....	100
3.1	Balanço hídrico de culturas .....	100
3.2	Efeitos das doses de calcários nos valores de pH do solo e saturação por bases e nos teores de cálcio e magnésio .....	102
3.3	Teores de micronutrientes no solo na profundidade de 0 a 20 cm, em função das doses de calcário .....	103
3.4	Concentração de nutrientes foliares, em função das doses de calcário .....	104
3.5	Produtividade e componentes agronômicos em função das doses de calcário .....	109
3.6	Correlação entre as produtividades, pH, teores de micronutrientes no solo e concentrações de micronutrientes nas folhas .....	110
4.	DISCUSSÃO .....	112
4.1	Atributos químicos do solo .....	112
4.2	Efeito da calagem sobre os micronutrientes no solo.....	115
4.3	Concentrações de nutrientes nas folhas.....	117
4.4	Caracteres agronômicos e produtividade.....	119
5.	CONCLUSÃO.....	123
	REFERÊNCIAS .....	124
	APÊNDICE A – modelos estatísticos para ph, ca, mg e v% entre 2020 e 2023 nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm.....	134
	APÊNDICE B – Altura de plantas e peso de mil grãos (pmg) em função das doses de calcário.....	136

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura brasileira tem experimentado nas últimas décadas um crescimento bastante acelerado da produção, que é resultado de uma combinação no aumento em área plantada e a produtividade das culturas. Somente na cultura da soja, estão sendo cultivados na safra 2023/24 mais de 45 milhões de hectares, dos quais uma boa parte representa áreas recém convertidas em sistemas para produção de grãos. Essas “áreas de abertura” como são chamadas, representam, principalmente, áreas que vinham sendo manejadas sob pastagens com baixo investimento e, portanto, esses solos são, em sua maioria, muito pobres quimicamente. Portanto, o manejo da fertilidade dos solos nessas condições é o primeiro passo na construção de sistemas sustentáveis.

Estima-se que cerca de 70% dos solos brasileiros são ácidos e, originados de material naturalmente pobre, além dos baixos valores de pH, esses solos apresentam baixa disponibilidade da maioria dos nutrientes, com destaque aos “cátions básicos” Ca e Mg, ao P e os micronutrientes B, Cu e Zn. Adicionalmente, a acidez elevada favorece a dissolução de cátions de caráter ácido, como Fe e Mn e, ainda, Al, que é tóxico às plantas. Logo, a primeira prática a ser recomendada nesses solos é a calagem. A utilização do calcário visa elevar o pH, aumentar os teores Ca e Mg e reduzir riscos de toxidez por Al nessas áreas.

Constatada a necessidade de correção do solo na implantação de um sistema de produção de grãos, dúvidas frequentes são: i) qual a dose de calcário a ser aplicada? ii) qual a profundidade de incorporação?

Por muito tempo, essas perguntas eram respondidas pelas doses calculadas pelos métodos oficiais que constam nos boletins regionais e a incorporação era realizada na chamada “camada arável”, até 20 cm de profundidade, muitas das vezes limitadas pelo equipamento utilizado. Contudo, novos trabalhos têm demonstrado que essas respostas não parecem ser simples, pois, frequentemente, as maiores produtividades das culturas e os teores adequados de nutrientes no solo só têm sido alcançadas em doses superiores àquelas calculadas. Adicionalmente, a incorporação profunda de corretivo tem demonstrado maior eficiência na construção da fertilidade do solo e na resiliência das culturas. Os resultados de produtores que atingem altas produtividades também tem confirmado isso e reforçam a necessidade de novos estudos.

A necessidade de maiores doses de calcário para correção dos solos podem ter causas variadas, sendo algumas delas: elevadas produtividades e maior sensibilidade à acidez do solo das cultivares modernas; sistemas intensificados e o alto uso de fertilizantes acidificantes;

necessidade de correção de camadas de solo mais profundas; problemas operacionais na aplicação, como perdas na distribuição do corretivo e falhas na incorporação; falta de condições adequadas para a reação, como presença de umidade e contato entre as partículas de calcário e o solo; e, por fim, as doses calculadas pelos métodos oficiais podem estar subestimando as necessidades de calagem por problemas de calibração a nível mesorregional ou, ainda, por uma subestimativa do poder tampão dos solos.

O poder tampão ou a capacidade tampão de pH de um solo representa a capacidade de um solo em resistir à variação de pH e é maior em solos argilosos e ricos em matéria orgânica, que apresentam alta capacidade de troca catiônica. Altas quantidades de Al no solo também afetam o tamponamento, pois, a hidrólise da forma monomérica  $Al^{3+}$  gera  $3H^+$  em solução, consumindo as hidroxilas negativamente carregadas e limitando o aumento de pH. Acredita-se que parte da subestimativa do poder tampão de solos ácidos pode estar ligada a formas de Al associadas à fração orgânica, que não são extraídas nas análises de rotina, mas que são potencialmente reativas e reagem com o calcário. Dessa forma, há a necessidade de se entender o quão lábil esses compartimentos de Al-MO são e se podem estar associados à maior exigência de calcário de algumas áreas.

A utilização de altas doses de calcário é criticada devido ao risco de redução da disponibilidade de micronutrientes. Porém, em solos tropicais altamente intemperizados é comum a deficiência de micronutrientes em terras sem histórico de cultivos e, por essa razão, a preocupação com redução de micronutrientes nessas áreas em função da calagem não tem sentido algum. Além disso, em áreas com teores adequados de micronutrientes, mesmo sobre altas doses de calcário em muitos casos não tem havido reduções significativas e tampouco ocorrência de deficiências pelas culturas.

Por fim, cabe salientar que o suprimento das demandas de micronutrientes pelas culturas podem ser atendidos por outros meios, como a utilização de adubos de plantio contendo quantidades apreciáveis dos elementos de interesse e, também, através da aplicação foliar desses nutrientes de forma parcelada ao longo do ciclo das culturas, como já tem sido amplamente adotado entre os produtores. Portanto, no que tange o manejo de micronutrientes, existem outras opções de manejo que são viáveis e permitem contornar eventuais cenários de baixa disponibilidade para as plantas. Já a correção de solo na implantação do sistema, por necessitar do preparo do solo, deve ser realizada de maneira eficiente afim de evitar a necessidade de um novo revolvimento do solo que, além de onerar os custos de produção, destrói os benefícios acumulados com anos de rotação de culturas em sistema de plantio direto SPD.

Dessa forma, objetivou-se nesse estudo avaliar o efeito de doses de calcário incorporados a 40 cm de profundidade sobre os atributos químicos do solo, formas de alumínio trocável e associados à MO, a disponibilidade de nutrientes e a produtividade de culturas anuais em quatro solos do estado de Minas Gerais.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

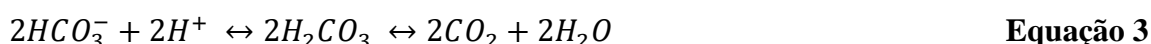
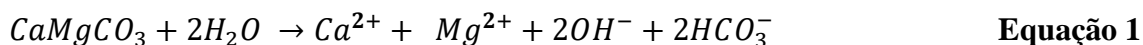
### 2.1 Correção da acidez do solo e disponibilidade de nutrientes

A acidez do solo é dividida em acidez ativa, acidez trocável e acidez não-trocável. A acidez ativa é expressa na forma de pH e se refere ao potencial hidrogeniônico, ou seja, a atividade de íons  $H^+$  na solução do solo. A acidez trocável é representada pelos íons  $H^+$  e  $Al^{3+}$  no complexo de troca, no entanto, nas condições brasileiras, em geral, é considerada apenas a participação do alumínio, dada a baixa capacidade de troca dos íons  $H^+$ . Por fim, a acidez não-trocável representa o H ligado covalentemente aos grupos -OH, e, junto com a acidez trocável, formam a acidez potencial (H+Al) (Motta; Melo, 2009; Raij, 2011; Souza et al., 2007).

O pH do solo é um dos fatores de maior impacto sobre a disponibilidade de nutrientes (Malavolta, 2006). Os solos do Cerrado brasileiro são, em sua maioria, ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, o que é comum em ambientes altamente intemperizados das regiões tropicais (Fageria; Baligar, 2008; Lopes; Guilherme, 2016). Sob elevada acidez, a produtividade das culturas é limitada pela falta de nutrientes e também pela toxidez devido à alta solubilidade de  $Fe^{2+}$  (Fageria et al., 2008; Pestana; Varennes; Correia, 2014),  $Mn^{2+}$  (Fageria; Nascente, 2014; Fernando; Lynch, 2015) e, principalmente,  $Al^{3+}$  que é tipicamente tóxico para as culturas (Oliveira; Pavan, 1996).

Em ambientes ácidos, a calagem deve ser a primeira prática implementada, visando elevar o pH e neutralizar  $Al^{3+}$ . O calcário é o principal corretivo utilizado na agricultura, obtido da moagem de rochas de calcita e dolomita e contém em sua composição carbonatos de Ca ( $CaCO_3$ ) e Mg ( $MgCO_3$ ), em proporções variadas. É um insumo relativamente barato, encontrado em abundância em diversas jazidas no Brasil, de fácil aplicação e de alta eficiência agrônômica. A dissociação do calcário em meio ácido e na presença de água libera os cátions  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e gera os ânions bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) e hidroxila ( $OH^-$ ), conforme a equação 1. Os cátions adicionados deslocam outros cátions trocáveis dos sítios de adsorção, como o  $Al^{3+}$ . Dessa forma, Ca e Mg passam a ocupar as cargas negativas da CTC, provocando o aumento dos teores absolutos dos elementos no solo e a saturação por bases. Os ânions, por sua vez, neutralizam os prótons  $H^+$  da acidez ativa da solução (equações 2 e 3), bem como aqueles provenientes da hidrólise do  $Al^{3+}$  à medida que o pH aumenta (equação 4). Com o aumento do pH, ocorre também a dissociação de íons  $H^+$  da superfície de coloides orgânicos e minerais, aumentando, portanto, a densidade de cargas negativas disponíveis – cargas variáveis e

dependentes de pH – e a capacidade de retenção de cátions (Fageria; Baligar, 2008; Tiecher et al., 2023; Warfvinge; Sverdrup, 1989).



A calagem afeta processos que impactam direta ou indiretamente a disponibilidade de nutrientes no solo. Entre os macronutrientes os efeitos geralmente são positivos, com incremento nos teores de Ca e Mg, presentes no calcário; N e S pelo aumento da mineralização da MO, e, ainda, para o N o benefício pode ser em função de condições mais favoráveis à fixação biológica de nitrogênio (FBN); aumento da disponibilidade de P, pela redução das perdas por adsorção e precipitação; e K, pela maior retenção desses cátions nas cargas negativas da CTC, quando a calagem é feita em doses adequadas e não há desequilíbrio entre os cátions Ca, Mg e K. Além disso, o aumento do pH também melhora a eficiência das adubações e, conseqüentemente, o aproveitamento desses nutrientes (Han et al., 2023; Holland et al., 2018; Novais et al., 2007).

Por outro lado, para os micronutrientes os efeitos são distintos. Em geral, aumentos de pH podem reduzir a solubilidade de cátions Cu, Fe, Mn, Zn, Ni e Co (elemento benéfico) (Fageria; Baligar, 2008). Para o B, os efeitos são ambíguos e dependem da faixa de pH considerada (Malavolta, 2006). A MO é um importante reservatório de B no solo e, com o aumento de pH, a atividade microbiana acelera o processo de mineralização dos compostos orgânicos, aumentando os teores disponíveis no solo (Holland et al., 2018). Porém, em valores de pH elevado ocorre a dissociação de ácido bórico em ânion borato, aumentando a adsorção nas argilas e hidróxidos de Fe e Al (Goldberg, 1997).

O Fe é o micronutriente mais afetado pela calagem e o aumento de uma unidade de pH pode reduzir em até 1000 vezes a solubilidade do elemento no solo. Comparativamente, para Cu, Mn e Zn nessa variação de pH podem ocorrer redução de até 100 vezes (Fageria; Baligar;

Clark, 2002; Fageria; Nascente, 2014). Apesar disso, como os teores de Fe no solo são elevados (Lopes; Guilherme, 2016), não são esperados prejuízos à nutrição das culturas. A disponibilidade de Fe também é alterada com a diminuição do potencial redox do solo, que favorece a redução de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ , forma absorvida pelas plantas. O efeito do ambiente redutor aumentando a disponibilidade de  $\text{Fe}^{2+}$  é bem descrito e, inclusive, pode causar problemas de fitotoxidez pelo elemento às culturas quando as condições permanecem por longo período (Fageria et al, 2008; Pestana; Varennes; Correia, 2014).

Os processos que afetam a disponibilidade de Cu no solo são adsorção, coprecipitação, quelação, complexação orgânica e fixação microbiana. Os produtos da hidrólise de Cu ( $\text{CuOH}^+$  e  $\text{Cu(OH)}_2$ ) predominam em pH abaixo de 7,0 e a solubilidade das formas catiônicas diminui com o aumento de pH (Kabata-pendias, 2001). A redução da acidez também afeta as cargas superficiais de coloides orgânicos e minerais, aumentando a força de adsorção do elemento (Fageria; Nascente, 2014; Joris et al., 2012), mas os efeitos do pH tendem a ser menores que para outros cátions divalentes (Hooda, 2010; Nascimento et al., 2007). A calagem pode diminuir a disponibilidade de cobre no solo (Ernani; Nascimento; Oliveira, 1998; Olego et al., 2021), no entanto, isso nem sempre ocorre (Alleoni et al., 2005; Moreira et al., 2017; Soratto; Crusciol, 2008b).

O pH afeta a solubilidade, adsorção e a oxidação de Mn no solo (Fageria; Nascente, 2014), e a redução da acidez diminui a disponibilidade do elemento com a precipitação de  $\text{MnO}_2$  (Schmidt; Husted 2019). As formas disponíveis também são alteradas pelo potencial redox, MO e a ação de bactérias oxidantes do gênero *Arthrobacter* (Malavolta et al., 2006). Sob condições hipóxicas, a redução de grandes quantidades de  $\text{Mn}^{4+}$  a  $\text{Mn}^{2+}$ , forma absorvida pelas plantas, pode levar à toxidez pelas culturas (Fernando; Lynch, 2015) que também pode ocorrer em ambientes aerados de solos muito ácidos (Fageria; Nascente, 2014). A calagem pode reduzir disponibilidade de Mn em sistemas convencionais e de semeadura direta (Alleoni et al., 2005), mas os efeitos podem ser intensificados com o revolvimento do solo (Joris et al., 2016; Moreira et al., 2017). Por outro lado, o aumento incomum de Mn também pode ocorrer com a aceleração da mineralização da MO (Florentino et al., 2021; Fonseca et al., 2010; Moreira et al., 2024). A divergência de resultados pode ser compreendida pela dinâmica do Mn no solo e os procedimentos de análise, onde simples alterações na metodologia podem provocar diferentes resultados em uma mesma amostra de solo e, dessa forma, somente o pH não define a disponibilidade do elemento para as plantas (Fonseca; Caires; Barth, 2010; Miyazawa et al., 1996; Moreira et al., 2006, 2016).

A disponibilidade de Zn é reduzida pela formação de espécies de baixa solubilidade como  $Zn(OH)_2$  e  $Zn(CO_3)$  com a elevação do pH (Moreira et al., 2017) e pelo aumento dos sítios de adsorção na superfície de argilas e óxidos de Fe, Al e Mn acima de pH 5,5 (Fageria; Baligar, 2002). Entre os micronutrientes catiônicos (Fe, Mn, Cu e Zn), o zinco é o que se apresenta em menor disponibilidade nos solos brasileiros (Lopes; Guilherme, 2016). E, embora possa ser reduzido com a calagem, a ausência de efeitos é encontrada em vários trabalhos (Caires et al., 2009; Fonseca; Caires; Barth, 2010; Moreira et al., 2024), e isso pode também ser devido aos baixos teores disponíveis. Porém, assim como comentado para o Mn, os teores de Zn podem variar conforme a metodologia de extração. O extrator ácido Mehlich-1 tem apresentado baixa sensibilidade às variações de Zn no solo pelo aumento de pH (Caires et al., 2009; Fonseca; Caires; Barth, 2010; Menezes et al. 2010).

Os resultados discutidos sugerem que os efeitos sobre a disponibilidade de micronutrientes no solo em função do aumento de pH nem sempre ocorrem como esperado. Apesar do pH afetar diretamente a disponibilidade, esse parâmetro não deve ser considerado individualmente, pois outros mecanismos atuam sobre as formas do elemento no solo (Hartemink; Barrow, 2023) e, em muitas situações, mesmo em pH elevado têm sido obtidas altas produtividades de grãos (Moreira et al., 2024).

## ***2.2 Necessidade de Calagem***

A determinação da necessidade de calagem para os solos brasileiros tem sido estudada desde meados da década de 60 e várias metodologias para recomendação foram apresentadas, adaptadas e/ou importadas nas décadas subsequentes (Teixeira, 2017). A diversidade de trabalhos apontava desde então a falta de um consenso entre os critérios, que foram vários:  $Al^{3+}$ ;  $Al^{3+}$  associado a um fator de correção de 1,5 a 3,0; pH de referência; pHOM; neutralização de  $Al^{3+}$  e elevação de Ca e Mg; saturação por bases (V%); pH SMP e elevação a níveis de pH de referência, além da combinação de critérios (Alvarez V.; Ribeiro, 1999; Catani; Gallo, 1955; Catani; Alonso, 1969; Cate, 1965; Coleman et al., 1959; CFSEMG, 1978; CFQS RS/SC, 2004; Kamprath, 1970; Raij; Cantarella; Zullo, 1979; Shoemaker; McLean; Pratt, 1961; Sousa; Lobato, 2004; Raij et al., 1997).

O método padrão para determinação da dose de calcário é a curva de neutralização obtida com a incubação de amostras de solo sob doses crescentes de  $CaCO_3$  puro, em condições controladas de umidade e temperatura, proposto inicialmente por Veitch (1902). As amostras

são incubadas por um período que varia entre 30 a 90 dias, em média, e finaliza com a estabilização dos valores pH. No entanto, esse método apresenta algumas limitações como o tempo de execução, o custo operacional e o fato de não considerar a resposta das plantas à correção. Assim, é aplicado no âmbito das pesquisas e na calibração de métodos mais práticos, que consigam recomendar, com boa aproximação, doses de calcário suficientes para a correção dos solos (Raij; Cantarella; Zullo, 1979; Teixeira et al., 2020b).

No Cerrado, os métodos oficiais mais utilizados para recomendação de calagem são o Método da neutralização do Al e incremento de Ca e Mg ou “Método de Minas Gerais” (Alvarez V.; Ribeiro, 1999) e o Método de Saturação por Bases (V%), popularmente chamado de “Método de São Paulo” (Raij et al., 1997). Além dessas metodologias, recomendações empíricas baseadas em %Ca e %Mg na CTC do solo podem ser utilizadas, já que esses percentuais tem sido associados a incrementos em produtividade das culturas (Fageria, 2008).

O método de Minas foi aprimorado desde a 3ª edição do livro “Recomendações Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais”. Em resumo, a fórmula pode ser dividida em duas partes: correção da acidez trocável e elevação nos teores de cálcio e magnésio. A correção visa neutralizar o alumínio, no entanto, considera o fator mt% (máxima saturação de Al tolerada pelas culturas), que é cerca de 15-20% para culturas anuais. Esse critério é bastante questionável, já que a presença de Al é prejudicial para o desenvolvimento das raízes das culturas (Batista et al., 2013; Joris et al., 2013). A segunda parte da fórmula é calculada para elevar os teores de Ca e Mg no solo, porém, para as culturas anuais o método considera como sendo adequado o valor de  $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Essa informação contradiz a própria recomendação do boletim no qual está vinculado, que define como nível crítico (NC) para Ca o teor de  $2,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Lopes; Alvarez V., 1999). Além disso, os teores adequados de Ca e Mg para produtividades de culturas anuais no Brasil Central têm sido superiores às recomendações desse manual (Fageria, 2001). Por fim, o valor final é multiplicado por um fator “Y”, que é uma estimativa da capacidade tampão do solo em função do teor de argila (Alvarez V., 1999). Por esse método, as doses calculadas frequentemente são baixas e há casos em que nem se recomenda calcário, mesmo havendo resposta pelas culturas (Moraes et al., 2023).

Moreira e Moraes (2018) propuseram um ajuste nesse método, desconsiderando o mt%, portanto, assumem que a tolerância a alumínio no solo deve ser igual a 0. Para a elevação de Ca e Mg duas formas foram apresentadas: para solos com CTC elevada ( $> 7,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), o somatório de Ca e Mg deve ser igual a 5, sendo 4 (Ca) e 1  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Mg). Para solos com CTC ( $< 7,0$ ), o somatório de Ca e Mg deve ser equivalente a 70% da CTC.

O Método de São Paulo é fundamentado pela relação direta e positiva entre pH e V% (Raij, 1981; Quaggio, 1983; Raij et al., 1997). As entradas na fórmula são a CTC a pH 7,0, os valores de V% atual e desejado e o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) para correção da quantidade de calcário a ser aplicada. A relação linear entre pH e V% confere maior embasamento científico a esse método e, pela facilidade no cálculo, é amplamente utilizada em todo o país (Besen et al., 2021; Caires; Joris; Churka, 2010).

Embora seja o método mais difundido no país atualmente, em condições de campo as doses calculadas têm subestimado as doses de calcário e, em muitos trabalhos, têm sido relatados valores de V% observados inferiores aos valores teóricos (Alleoni et al., 2005; Barbosa Filho; Fageria; Zimmermann, 2005; Neto et al., 2000). Em um trabalho de Raij et al. (1998), a dose de calcário para elevar a V% a 70 de um Latossolo vermelho argiloso seria de 3,6 Mg ha<sup>-1</sup>, porém, 41 meses após a aplicação e com uma dose muito superior, de 12 Mg ha<sup>-1</sup>, a saturação alcançada foi de apenas 64%. Explorando os dados de Fageria e Stone (2004) em um Latossolo vermelho de textura média (36,5% argila), a dose necessária para elevar a V% a 70 em 0-20 cm seria de 3,1 Mg ha<sup>-1</sup>, no entanto, em doses de 12 e 24 Mg ha<sup>-1</sup> a saturação por bases alcançada, na média de três cultivos, foi de 60,2 e 69,8%, respectivamente. Em outro trabalho, a dose de 15 t ha<sup>-1</sup> promoveu a elevação da saturação por bases de 29% para 60%, além de promover aumento de 37% na produtividade do feijoeiro em um Latossolo Vermelho no estado de Goiás (Barbosa Filho; Silva, 2000). Para o exemplo, a dose calculada para elevar V% a 70% era de apenas 3,2 t ha<sup>-1</sup>. Caires e Rosolem (1993, citado por Alleoni et al., 2005) observaram que até o V% de 55-60% os valores atingidos eram muito próximos daqueles calculados, mas se distanciavam a partir daí.

Doses de calcário insuficientes para a correção têm sido observadas em diferentes métodos e até mesmo sob condições controladas (Teixeira et al., 2020). Por essa razão, em condições de campo têm sido relatados aumentos de produtividades em doses muito superiores às doses calculadas (Barbosa Filho; Silva, 2000; Camargo et al., 1982; Fageria, 2008; Fageria et al., 2013; Moraes et al., 2023; Moreira et al., 2024; Raij et al., 1998; Raij, 2011).

Outro aspecto intrigante quanto ao uso de altas doses de calcário está relacionada com os valores de pH atingidos. Em muitos trabalhos, mesmo sob doses elevadas de calcário (Moraes et al., 2023; Fageria, 2001) não tem sido observados valores de pH acima de 7,0 e, quando ocorrem, não tem causado redução de produtividade, já que o rendimento das culturas tem sido diretamente associado aos valores de pH do solo (Moreira et al., 2024).

A capacidade tampão de pH do solo é definida como a resistência que o meio apresenta à variação de pH (Raij, 1981). Essa propriedade de manutenção de equilíbrio do pH da solução

quando perturbada pela adição de prótons ( $H^+$ ) ou hidroxilas ( $OH^-$ ) é variável entre os solos e afeta a necessidade e a frequência de calagem. Em solos intemperizados, de regiões tropicais, o tamponamento está associado à quantidade e taxa de desprotonação de grupos  $-OH$  da superfície de argilominerais 1:1 (caulinita), óxidos/hidróxidos de Fe e Al e, principalmente, aos grupos funcionais da matéria orgânica, que se apresentam como ácido fraco (Ponto de Carga Zero (PCZ) = 2,0) (Mello; Mota, 2009). Em solos ácidos, a acidez trocável ( $Al^{3+}$ ) contribui com a manutenção de baixos valores de pH pela hidrólise desse cátion até o pH 5,4-5,5. Além disso, foi sugerido que outras formas de Al no solo, formas organicamente complexadas, também afetam o tamponamento e controlam as quantidades de Al em solução (Bloom; Juo; Kamprath, 1979).

## ***2.3 Alumínio no solo***

### **2.3.1 Formas de alumínio no solo**

O alumínio é o cátion mais abundante da crosta terrestre, participando da composição de minerais primários e secundários. Seu volume representa 0,47% da crosta, enquanto seu peso representa cerca de 8,1% da superfície terrestre (Melo; Alleoni, 2019). Grande parte do alumínio nos solos encontra-se insolúvel, na forma de aluminossilicatos ou precipitados em formas indisponíveis às plantas. Todavia, a acidificação do solo, por fatores pedogenéticos ou antrópicos, pode aumentar a atividade desse metal, atingindo formas e níveis fitotóxicos (Delhaize; Ryan, 1995). Esse conhecimento implica nos cuidados e na necessidade de correção para viabilidade da agricultura sobre solos ácidos (Rabel, 2018).

Nos solos brasileiros, o elemento está presente na composição da estrutura de minerais da fração argila, como as argilas silicatadas do tipo 1:1 (caulinita), minerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas e, em menor grau, nas argilas do tipo 2:1, que possuem baixa estabilidade em solos ácidos. Os óxidos de Al, como a gibbsita, também concentram grande quantidade do elemento e estão presentes em grande proporção nos solos intemperizados do Brasil. À medida que avança o intemperismo, com a redução dos sítios de troca de cátions, o alumínio é liberado para a solução, assumindo formas ativas e tóxicas às plantas. Portanto, a atividade de  $Al^{3+}$  é maior em condições de solos mais intemperizados (Melo; Alleoni, 2019).

O teor total de Al no solo costuma ser elevado, mas apenas uma pequena parcela é trocável e o equilíbrio com a fase aquosa é definida pelo pH. A forma monomérica  $Al^{3+}$  representa a acidez trocável e predomina em  $pH < 5,4$ , tamponando o pH do solo nessa faixa. À medida que o pH é elevado e o Al é deslocado dos sítios de adsorção, ocorre a hidrólise de  $Al^{3+}$  em solução, com a liberação de íons  $H^+$ , como nas equações 5, 6 e 7. Para cada íon  $Al^{3+}$  neutralizado, são liberados três íons  $H^+$  em solução, favorecendo a manutenção da acidez devido ao consumo de  $OH^-$  na neutralização. Acima de  $pH (H_2O) 5,4$  todo o alumínio é precipitado na forma de hidróxido  $Al(OH)_3$ , que não apresenta toxicidade às plantas (Souza; Miranda; Oliveira, 2007). Esse é um dos objetivos quando se recomenda calagem em solos ácidos (Lopes; Guilherme, 2004). O Al permanece insolúvel na faixa de pH entre 6,0 e 8,0 na forma de  $Al(OH)_3$ , mas em condições alcalinas, pode ainda ocorrer a forma ionizada de  $Al(OH)_4^-$ , mas que não é tóxica (Hernandez-soriano, 2012; Bissani; Ernani, 2023).



O Al pode ser complexado por ligantes orgânico e a interação Al-MO pode reduzir seu caráter lábil (Amaral et al, 2004), reduzindo a atividade de  $Al^{3+}$  na solução do solo e reduzindo a toxidez às plantas (Alleoni et al., 2010). A interação organometálica também pode assumir um papel protetor contra degradação microbiana desses compostos, devido à formação de agregados estáveis (Hernandez-soriano, 2012). Em áreas sob sistema de plantio direto, em razão da manutenção e/ou incremento nos teores da MO, a complexação orgânica do alumínio trocável atua como ferramenta para atenuar a toxidez às culturas (Oliveira et al., 2022).

A complexação de Al ocorre preferencialmente com ligantes orgânicos contendo O, como os grupos funcionais carboxílicos e hidroxílicos e podem envolver formas monoméricas de Al ou formas polimerizadas (Dick et al., 2009). As reações de complexação de metais pela MO podem ser do tipo eletrostática (esfera externa) ou mais complexas, com ligações covalentes (esfera interna) e a estabilidade de ligação depende de propriedades eletroquímicas do elemento e das características da molécula orgânica (Silva; Mendonça, 2007).

O compartimento Al-MO integra o reservatório de Al potencialmente reativo, capaz de doar prótons em  $\text{pH} < 7,0$ , e é provavelmente o principal responsável pelo tamponamento de pH e Al na solução em solos ácidos (Juo; Kamprarth, 1979). Dessa forma, a interação entre Al e MO assume papel importante nas propriedades de solos com elevada acidez e o uso de extratores com afinidade por essa fração permitem o melhor entendimento da dinâmica de complexos organo-Al e como interagem com as práticas agrícolas (Urrutia; Macías; Garcia-rodeja, 1995; Li; Johnson, 2016)

### 2.3.2 Fracionamento de Al no solo e implicações práticas

Os compartimentos de Al no solo podem ser estudados a partir de técnicas de dissolução seletivas, com extratores com especificidade a uma determinada fração, ou por extração sequencial, com a utilização de um mesmo extrator repetidamente por quantas vezes for necessário, até que as quantidades extraídas se estabilizem. Os principais extratores de formas de Al no solo, em ordem crescente de capacidade de extração, são: cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ )  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , cloreto de potássio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (KCl), cloreto de lantânio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  ( $\text{LaCl}_3$ ), Cloreto de cobre  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ( $\text{CuCl}_2$ ), pirofosfato de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e oxalato de amônio  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  (Coelho et al., 2010; Garcia-rodeja, 2004).

A determinação de teores trocáveis de Al é um procedimento de rotina em análises químicas de solos, pois essa forma representa a forma trocável e tóxica às plantas (Teixeira et al., 2017). O princípio da troca catiônica fundamenta alguns dos extratores propostos, como cloreto de amônio, acetato de amônio e cloreto de potássio. No Brasil, a solução extratora cloreto de potássio não tamponado ( $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ) é amplamente utilizada, pois extrai também os cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (Silva et al., 2009; Teixeira et al., 2017).

Uma limitação do extrator é o fato de não ter capacidade de extrair Al organicamente ligado e sua eficiência diminui em solos ricos em MO (Hargrove; Thomas, 1984). Por essa razão, o reservatório de Al potencialmente reativo pode ser subestimado se considerados somente os teores em KCl (Aitken, 1992). Foi relatado que em doses de calcário teoricamente suficientes para neutralizar 1,5 vezes a acidez trocável, após a reação ainda havia quantidades consideráveis de Al disponíveis. E, nessas condições, para neutralizar todo o Al seriam necessárias doses de até 2 vezes a quantidade de Al em KCl (Kamprarth, 1970). Portanto, foi constatada a necessidade de extratores mais fortes para estimar o reservatório de Al potencialmente lábil.

O extrator cloreto de cobre  $1 \text{ mol L}^{-1}$  foi inicialmente proposto por Juo e Kamprath (1979) como um extrator para a forma de Al não trocável, potencialmente reativa ou Al ligado à complexos orgânicos. A eficiência do extrator está associada principalmente a dois fatores: o baixo pH da solução (variando entre 2,7 a 3,3) e a alta capacidade de complexação do cátion  $\text{Cu}^{2+}$  com a MO. Nesse trabalho, comparativamente, o extrator  $\text{CuCl}_2$  extraiu até 12 vezes mais Al que a solução KCl em amostras de perfis ácidos de argissolos e latossolos. No entanto, foi relatado que em algumas amostras o extrator também pode solubilizar Al dos argilominerais 2:1 e, nessas situações, as quantidades de Al extraídas em  $\text{CuCl}_2$  podem superestimar as quantidades organicamente ligadas (Juo; Kamprath, 1979; Hargrove, Thomas, 1981). Mas, apesar disso, em vários trabalhos o  $\text{CuCl}_2$  tem sido utilizado para extrair Al complexado com a MO e as quantidades extraídas são positivamente relacionadas com o C orgânico do solo (Garcia-rodeja et al., 2004; Yvanes-giuliani et al, 2016).

Em trabalhos posteriores foram adotadas soluções menos concentradas de  $\text{CuCl}_2$  a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (Aitken, 1992; Garcia-rodeja et al., 2004; Hargrove; thomas, 1984; Oates; Kamprath, 1983a, 1983b; Campos et al., 2014; Urrutia; Macías; Garcia-rodeja, 1995) onde também foram confirmadas a maior capacidade de extração em relação ao KCl.

Foi verificado em alguns trabalhos que as formas de Al em  $\text{CuCl}_2$  reduziram após a calagem, indicando que essas formas são reativas e interagem com as doses aplicadas (Figueiredo; Almeida, 1991; Zambrosi; Alleoni, Caires, 2007). Takahashi et al. (2005) verificaram que a calagem reduziu até 43% dessa fração de Al no solo. Aitken (1992) relatou que para atingir o pH 6,5 os teores de Al em  $\text{CuCl}_2$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  apresentaram boa aproximação, enquanto que os teores em KCl seriam suficientes apenas para elevar o pH a 5,5. Esses resultados reforçam as hipóteses iniciais de Juo e Kamprath (1979) e indicam que de fato outras formas de acidez atuam no tamponamento do solo e a investigação das formas de Al organicamente complexadas extraídas em  $\text{CuCl}_2$  parecem promissoras.

Em solos ácidos sem histórico de cultivo recente, têm sido necessárias altas doses de calcário para a correção dos solos e os valores de pH atingidos parecem não refletir o tamponamento tipicamente conhecido desses solos (Fageria, 2001; Moraes et al., 2023). Assim como observados por outros autores, a ocorrência de uma subestimativa da capacidade tampão desses solos pode ser a explicação para as observações. No entanto, carecem de mais estudos.

## REFERÊNCIAS

- AITKEN, R. L. Relationships between extractable Al, selected soil properties, pH buffer capacity and lime requirement in some acidic Queensland soils. **Soil research**, v. 30, n. 2, p. 119, 1992.
- ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 74, n. 3, p. 1010–1017, 2010.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 29, n. 6, p. 923–934, 2005.
- ALVARES V., V. H. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes Em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, cap. 5, p. 25-32
- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes Em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, cap. 8, p. 43–60.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 115-123, 2004.
- BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e incorporada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 3, p. 507–514, 2005.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1317-1324, 2000.
- BATISTA, M. F. et al. Alumínio em plantas de milho: influência no crescimento e na morfoanatomia de raízes e folhas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 177-187, 2013.
- BESEN, M. R. et al. Forms of lime application and use of phosphogypsum in low acid soil in southern Brazil: soybean-wheat yield and soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021.
- BISSANI, C. A.; ERNANI, P. R. As reações ácido-base do solo. In: TIECHER, T. et al. **Química do solo**. 1. ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2023, cap. 6. P. 205-240.

BLOOM, P. R.; MCBRIDE, M. B.; WEAVER, R. M. Aluminum organic matter in acid soils: Buffering and solution aluminum activity. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 3, p. 488–493, 1979.

CAIRES, E. F. et al. Surface liming and zinc availability in a long-term experiment under no-till system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 40, n. 17–18, p. 2898–2911, 2009.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil: Liming and gypsum in no-till farming. **Soil use and management**, v. 27, n. 1, p. 45–53, 2011.

CAIRES, E. F.; ROSOLEM, C. A. Calagem em genótipos de amendoim. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n. 2, p. 193-202, 1993.

CAMARGO, A. P. de et al. Efeito da calagem nas produções de cinco cultivos de milho, seguidos de algodão e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 7, p. 1007-1012, 1982.

CAMPOS, J. R. DA R. et al. Extração e quantificação de alumínio trocável em Organossolos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 49, n. 3, p. 207–214, 2014.

CATANI, R. A.; GALLO, J. R. Avaliação da exigência em calcário dos solos do Estado de São Paulo, mediante correlação entre o pH e a porcentagem da saturação em bases. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 30, n. 1/3, p. 49-60, 1955

CATE, R. **Sugestões para adubação na base de análise de solo**. Recife: North Carolina State University/International Soil Test Project, 1965. 16p.

COELHO, M. R. et al. Seletividade do pirofosfato de sódio e de cloretos não tamponados (CuCl<sub>2</sub> e LaCl<sub>3</sub>) como extratores de alumínio associado à matéria orgânica em solos de restinga do estado de São Paulo. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 34, n. 5, p. 1561–1572, 2010.

COLEMAN, N. T.; KAMPRATH, E. J.; WEED, S. B. Liming. **Advances in Agronomy**, v. 10, p. 475-522, 1959.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG (Lavras, MG). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 3ª aproximação**. Belo Horizonte, 1978. 80p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. **Plant Physiol**, v. 1, p. 31–36, 1995.

DICK, D. P. et al. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo**: parte II – aplicações. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, cap. 11, p. 1-68.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; OLIVEIRA, L. C. Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 22, n. 2, p. 275–280, 1998.

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

FAGERIA, N. K. et al. Iron toxicity in lowland rice. **Journal of plant nutrition**, v. 31, n. 9, p. 1676-1697, 2008.

FAGERIA, N. K. et al. Optimal acidity indices for soybean production in Brazilian oxisols. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 44, n. 20, p. 2941–2951, 2013.

FAGERIA, N. K. Optimum soil acidity indices for dry bean production on an oxisol in no-tillage system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 39, n. 5–6, p. 845–857, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Chapter 7 ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2008. p. 345–399.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in Crop Production. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2002. p. 185–268.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of south American soils for sustainable crop production. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 221–275.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 73–78, 2004.

FERNANDO, D. R.; LYNCH, Jonathan P. Manganese phytotoxicity: new light on an old problem. **Annals of botany**, v. 116, n. 3, p. 313-319, 2015.

FIGUEIREDO, O. A. R.; ALMEIDA, J. A. Quantificação de formas trocáveis e não trocáveis de alumínio em solos ácidos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p. 151-156, 1991.

FLORENTINO, A. L. et al. Nutritional status of Eucalyptus plantation and chemical attributes of a Ferralsol amended with lime and copper plus zinc. **Forest ecology and management**, v. 502, n. 119742, p. 119742, 2021.

FONSECA, A. F. da; CAIRES, E. F.; BARTH, G. Extraction methods and availability of micronutrients for wheat under a no-till system with a surface application of lime. **Scientia agricola**, v. 67, n. 1, p. 60–70, 2010.

GARCÍA-RODEJA, E. et al. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. **Catena**, v. 56, n. 1–3, p. 155–183, 2004.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. Em: **Boron in Soils and Plants: Reviews**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. p. 35–48.

HAN, T. et al. Soil potassium regulation by initial K level and acidification degree when subjected to liming: A meta-analysis and long-term field experiment. **Catena**, v. 232, n. 107408, p. 107408, 2023.

HARGROVE, W. L.; THOMAS, G. W. Extraction of aluminum from aluminum-organic matter Complexes1. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 45, n. 1, p. 151, 1981.

HARGROVE, W. L.; THOMAS, G. W. Extraction of aluminum from aluminum-organic matter in relation to titratable acidity. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 48, n. 6, p. 1458–1460, 1984.

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. **Plant and soil**, v. 486, n. 1–2, p. 209–215, 2023.

HERNANDEZ-SORIANO, M. C.; JIMENEZ-LOPEZ, J. C. Efeitos do teor de água do solo e adição de matéria orgânica na especiação e biodisponibilidade de metais pesados. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 423, p. 55-61, 2012.

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

HOODA, P. S. **Trace elements in soils**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2010.

JORIS, H. A. W. et al. Adsorção de metais pesados após calagem superficial em um Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 1-10, 2012.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424, 2013.

JORIS, H. A. W. et al. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil & tillage research**, v. 162, p. 68–77, 2016.

JUO, A. S. R.; KAMPRATH, E. J. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 1, p. 35–38, 1979.

JUO, A. S. R.; KAMPRATH, E. J. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 1, p. 35–38, 1979.

KABATA-PENDIAS, Al. **Trace elements in soils**. 3rd ed., CRC Press, 2000.

KAMPRATH, E. J. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 34, n. 2, p. 252–254, 1970.

KAMPRATH, E. J. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 34, n. 2, p. 252–254, 1970.

LI, W.; JOHNSON, C. E. Relationships among pH, aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States. **Geoderma**, v. 271, p. 234-242, 2016.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 1–72.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 637p..

MENEZES, A. A. et al. Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DPTA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 417-424, 2010.

MIYAZAWA, M. et al. Manganese dynamic in acid soil and uptake by maize seedlings. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 27, n. 9–10, p. 2349–2359, 1996.

MORAES, F. A. de et al. Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 144, n. 126763, p. 126763, 2023.

MOREIRA, S. G. et al. Chemical forms in soil and availability of manganese and zinc to soybean in soil under different tillage systems. **Soil & tillage research**, v. 163, p. 41–53, 2016.

MOREIRA, S. G. et al. Deep incorporation of high limestones rates affects the macro and micronutrients availability and the accumulated grain yield in three acidic sites in Brazil. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 154, n. 127074, p. 127074, 2024.

MOREIRA, S. G. et al. Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 89, 2017.

MOREIRA, S. G. MORAES, F. A. de. Construção da Fertilidade do solo para Sistema de Produção de Culturas Anuais. In: PAES, M. C. D.; PINHO, R. G. V.; MOREIRA, S. G. (Ed.). **Livro de Palestras: Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil**. Sete Lagoas: ABMS, 2018, cap. 13, p. 347-383.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. de F. Química de solos ácidos. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo**: parte II – aplicações. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, cap. 18, p. 313-380.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 5, 1017 p.

OATES, K. M.; KAMPRATH, E. J. Soil acidity and liming: I. effect of the extracting solution cation and pH on the removal of aluminum from acid soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 47, n. 4, p. 686–689, 1983a.

OATES, K. M.; KAMPRATH, E. J. Soil acidity and liming: II. Evaluation of using aluminum extracted by various chloride salts for determining lime requirements. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 47, n. 4, p. 690–692, 1983b.

OLEGO, M. A. et al. Effects of overliming on the nutritional status of grapevines with special reference to micronutrient content. **OENO One**, v. 55, n. 2, p. 57–73, 2021.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & tillage research**, v. 38, n. 1–2, p. 47–57, 1996.

OLIVEIRA, F. F. et al. Toxicidade do Alumínio no Sistema de Plantio Direto: Um Estudo de Caso. **Revista Internacional de Ciências**, v. 11, n. 07, pág. 19-27, 2022.

PESTANA, M.; VARENNES, A. de; CORREIA, P. J. Clorose férrica induzida pelo calcário. **Revista Ceres**, v. 61, p. 849-855, 2014.

RABEL, D. O. et al. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: A study from subtropical Brazil. **Soils Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, 2018.

RAIJ, B. V. et al. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 22, n. 1, p. 101–108, 1998.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011a. 420 p.

RAIJ, B. V. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações agronômicas**. n. 135, International Plant Nutrition Institute, 2011b, p. 8-18.

RAIJ, B. V.; et al. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC & Fundação IAC (Boletim Técnico), 1997. 285 p.

RAIJ, B. V. **Avaliação de fertilidade do solo**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1981. 142p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; ZULLO, M A T. The SMP-buffer method for the determination of lime requirement of soils of the State of São Paulo. **Bragantia**, v. 38, p. 57-69, 1979.

SCHMIDT, Sidsel Birkelund; HUSTED, Soren. As propriedades bioquímicas do manganês nas plantas. **Plantas**, v. 8, n. 10, pág. 381, 2019.

SHIGEMITSU, A. Extraction of active aluminum from acid soils in Japan with different reagents. **Geoderma**, Amsterdam, v.14, p.63-74, 1975.

SHOEMAKER, H. E.; McLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 25, n. 4, p. 274-277, 1961.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária, 1999, 370 p.

SILVA; I. R. da; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 6, p. 275-374.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 32, n. 2, p. 675–688, 2008.

SOUZA, D. M. de; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUZA, D. M. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, cap. 3, p. 81-96.

SOUZA, D. M. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVERIA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 5, p. 205-274.

SOUZA, D. M. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVERIA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 5, p. 205-274.

TAKAHASHI, T. et al. Effect of liming on organically complexed aluminum of nonallophanic Andosols from northeastern Japan. **Geoderma**, v. 130, n. 1–2, p. 26–34, 2006.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revisada e ampliada, Brasília: Embrapa, 2017, 574 p.

TEIXEIRA, W. G. et al. Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 44, 2020b.

TEIXEIRA, Welldy Gonçalves. **Novos métodos de recomendação da necessidade de calagem e especiação de cálcio por espectroscopia XANES em solos de Minas Gerais**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, 2017, 126 p.

TIECHER, T. et al. Base saturation is an inadequate term for Soil Science. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 46, 2022.

URRUTIA, M.; MACÍAS, F.; GARCÍA-RODEJA, E. Evaluación del  $\text{CuCl}_2$  y del  $\text{LaCl}_3$  como extractantes de aluminio en suelos ácidos de Galicia. **Nova acta científica compostelana. Bioloxia: NACC. Bioloxia**, v. 5, 1995.

VEITCH, F. P. The estimation of soil acidity and the lime requirements of soils. **Journal of the American Chemical Society**, v. 24, n. 11, p. 1120-1128, 1902.

WARFVINGE, P.; SVERDRUP, H. Modeling limestone dissolution in soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 53, n. 1, p. 44–51, 1989.

WEIRICH NETO, Pedro Henrique et al. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, v. 30, p. 257-261, 2000.

YVANES-GIULIANI, Y. A. M. et al. Isotopically exchangeable Al in coastal lowland acid sulfate soils. **The Science of the total environment**, v. 542, p. 129–135, 2016.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Teores de alumínio trocável e não trocável após calagem e gessagem em Latossolo sob plantio direto. **Bragantia: boletim tecnico do Instituto Agronomico do Estado de Sao Paulo**, v. 66, n. 3, p. 487–495, 2007.

## **ARTIGO 1 - EFEITOS DA CALAGEM INCORPORADA A 40 CM DE PROFUNDIDADE NAS FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO, ACIDEZ POTENCIAL E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

### **RESUMO**

O Al, além de ser prejudicial às plantas, também afeta o tamponamento de pH da solução em solos ácidos e a magnitude de expressão está relacionado com o tamanho do reservatório de Al potencialmente reativo. Objetivou-se nesse trabalho avaliar o efeito da calagem sobre a acidez, formas de alumínio trocável e associado à matéria orgânica (MO) e o rendimento das culturas em solos do Estado de Minas Gerais. Os experimentos foram implantados de forma independente entre 2018 e 2019 nas cidades de Uberlândia (Local 1), Araguari (Local 2), São João del Rei (Local 3) e Formiga (Local 4), sobre solos com textura variando de franco-arenoso a muito argiloso. Os tratamentos avaliados foram doses de calcário incorporadas a 40 cm com grade pesada, antes da implantação do sistema de plantio direto. Nos locais 1, 2 e 3, as doses incorporadas foram 0,0; 4,0; 8,0; 12,0; 16,0 e 20,0 Mg ha<sup>-1</sup>. No local 4, além dessas doses, foram adicionadas as doses 24,0 e 28,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Amostras de solo foram retiradas cerca de três anos da incorporação do corretivo para avaliação dos valores de pH, (H+Al), Al trocável, Al associado à MO e saturação por alumínio (m %). Foram avaliadas as produtividades relativas de grãos e acumuladas em função dos tratamentos. As análises de dados foram realizadas nos softwares Jamovi e R. De modo geral, a calagem elevou o pH dos solos em todos os locais e em todas as profundidades amostradas. A acidez potencial dos solos foi reduzida com o incremento de pH, mas não totalmente neutralizada, mesmo em valores de pH acima de 7,0. Os teores de Al extraídos em KCl variaram entre os locais e reduziram significativamente nos locais 2 e 4, não sendo modificados pelas doses de calcário nos locais 1 e 3, cujos teores médios foram 0,15 e 0,10 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Os teores de Al ligados à MO (extração por CuCl<sub>2</sub>) foram muito superiores aos extraídos em KCl, sendo cerca de 7 a 93 vezes maiores nos diferentes locais. As formas de Al não trocáveis também foram influenciadas pela calagem, com reduções significativas em todos os locais estudados. Assim, estas formas podem estar relacionadas com o tamponamento de Al e pH da solução. A elevação do pH e a redução de H+Al, Al e m % foram significativamente correlacionados com a produtividade das diferentes culturas ao longo do período avaliado. Para os locais 1, 2 e 4, a calagem incrementou a produtividade acumulada de grãos, sendo máxima nas doses de 13,2, 17,1 e 18,7 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Palavras-chave:** Acidez do solo. Alumínio organicamente complexado, extrator CuCl<sub>2</sub>, capacidade tampão de pH, perfil do solo.

## ABSTRACT

Aluminum, in addition to being harmful to plants, also affects the buffering of the pH of the solution in soils acids and the magnitude of expression is related to the size of the reactive ambient Al reservoir. The objective of this work was to evaluate the effect of calculation on acidity, forms of exchangeable aluminum and those associated with humic substances and crop yield in soils in the State of Minas Gerais. The experiments were implemented between 2018 and 2019 in the cities of Uberlândia (Local 1), Araguari (Local 2), São João del Rei (Local 3) and Formiga (Local 4), on soils with textures ranging from sandy loam to very clayey. The studies evaluated were doses of limestone embedded at 40 cm with a heavy degree in the implementation of the direct planting system (SPD). At sites 1, 2 and 3 the internal doses were 0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0 and 20.0 Mg ha<sup>-1</sup>. At site 4, in addition to these doses, lime rates of 24.0 and 28.0 Mg ha<sup>-1</sup> were tested. Soil samples were taken in 2022 for analysis of the chemical attributes pH, (H+Al), Al and aluminum saturation (m%). Aluminum was also extracted in CuCl<sub>2</sub> to evaluate non-exchangeable details, associated with organic complexes. Grain yields were evaluated in terms of soil chemical interruptions and the accumulated yield in the period was evaluated depending on the treatments. Data analyzes were carried out using Jamovi and R software. High soil pH calculation was calculated in all locations and at all sampled depths, with the exception of the 20-40 cm layer in Location 2. The potential acidity of the soils was lower with the increase in pH, but it was not completely reset. The levels of Al extracted in KCl varied between sites and were significantly reduced at Sites 2 and 4, while the amounts extracted at Sites 1 and 3 were, on average, 0.15 and 0.10 cmolc dm<sup>-3</sup>. The Al contents in the CuCl<sub>2</sub> extractor were much higher compared to the KCl contents, varying on average from 6.6 to 92.7 times in different locations. Non-exchangeable Al forms were also influenced by liming, with significant reductions in all studied locations. The increase in pH and the reduction in H+Al, Al and m% were significantly correlated with the productivity of different crops throughout the evaluated period. For Locations 1, 2 and 4, liming increased the accumulated grain production, being maximum at doses of 13.2, 17.1 and 18.7 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. We concluded that liming alleviated soil acidity and increased crop productivity. Liming also had an effect on non-exchangeable forms of Al in the soil and these forms may be related to Al buffering and solution pH.

**Keywords:** Soil acidity. Organically complexed aluminum. CuCl<sub>2</sub>. pH buffer capacity. Grain production.

## 1. INTRODUÇÃO

A elevada acidez do solo é um fator limitante ao desenvolvimento e rendimento das culturas e recebe maior atenção em solos tropicais, devido ao avançado intemperismo. Valores de pH (H<sub>2</sub>O) < 5,5 são comuns em condições naturais nos solos brasileiros (Auler et al., 2019; Fageria; Baligar; Li, 2009; Kaminski et al., 2000) e geralmente estão associados com concentrações fitotóxicas de Al em solução e a deficiência de nutrientes como P, Ca, Mg e K (Lopes; Guilherme, 2016). Essas condições criam barreiras químicas que limitam o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, prejudicam o rendimento das culturas (Bortoluzzi et al., 2014; Costa et al., 2018; Leite et al., 2006). Especialmente o Al, quando em altas concentrações, pode limitar significativamente o crescimento de raízes (Pavan et al., 1982).

O alumínio da fração trocável (Al<sup>3+</sup>) do solo é frequentemente extraído em solução não tamponada de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (Al<sub>KCl</sub>) nas análises de rotina (Teixeira et al., 2017). Além da fitotoxicidade às culturas (Pavan et al., 1982), esse cátion ácido afeta o tamponamento de pH do solo (Jackson, 1963). A hidrólise completa de Al<sup>3+</sup> ocorre por volta de pH 5,5 e a estequiometria da reação indica que são liberados três íons H<sup>+</sup> na formação de AlOH<sup>2+</sup>, Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> e Al(OH)<sub>3</sub> (Öhman, 1988). Como consequência, a elevação de pH com o uso de corretivos de solo será influenciada pelo conteúdo de Al trocável. Nesse sentido, alguns trabalhos foram conduzidos para estudar a eficiência de uso de Al<sup>3+</sup> na predição da necessidade de calagem (NC), como em Kamprath (1970). Conforme reportado pelo autor, as doses de calcário calculadas por esse critério reagem principalmente com a acidez trocável e pouca alteração é observada na fração não trocável, com efeitos semelhantes quando aplicadas doses teoricamente suficientes para neutralizar 100% e 150% do Al<sub>KCl</sub>. Portanto, nesse trabalho, para culturas sensíveis à saturação por alumínio (m %), foi sugerido que as doses calculadas por esse critério fossem multiplicadas pelo fator 2. O Al ainda é um dos critérios que compõe a fórmula de recomendação de calagem de Minas Gerais, sendo expresso em termos de m % tolerada pelas culturas (Alvarez V.; Ribeiro, 1999). Porém, Raij et al. (1983) criticaram a utilização do alumínio trocável como critério para definição de doses de calcário, pois, em cultivos por diferentes safras e em três locais, foi observado que a produtividade das culturas continuava aumentando mesmo após a neutralização do Al<sup>3+</sup>. Assim, as doses por esse método poderiam subestimar as reais necessidades de calagem nesses solos.

Além das formas livres e hidroxiladas positivamente carregadas, o Al pode formar complexos orgânicos, principalmente ligados aos ácidos carboxílicos e fenólicos, com

estabilidade variada, e que, em muitos casos, reduzem os efeitos danosos do  $Al^{3+}$  em sistemas com matéria orgânica (MO) elevada (Alleoni et al., 2010; Vieira et al., 2008). A fração organicamente complexada, também denominada como Al não trocável, integra o reservatório de Al potencialmente reativo e é provavelmente um dos principais componentes do tamponamento de pH na faixa de 4 a 6 e controle da atividade de  $Al^{3+}$  em solos ácidos (Bloom; McBride; Weaver, 1979; Juo; Kamprath, 1979). Por outro lado, o extrator KCl tem baixa capacidade de extrair o Al ligado às substâncias húmicas e, por essa razão, as soluções de  $LaCl_3$  (Bloom; McBride; Weaver, 1979) e  $CuCl_2$  (Juo; Kamprath, 1979), que também extraem Al trocável, foram sugeridas. O cloreto de lantânio extrai Al fracamente ligado à MO ( $Al_{LaCl_3}$ ), enquanto o cloreto de cobre tem a capacidade de extrair o Al fortemente retido ( $Al_{CuCl_2}$ ). Dessa forma, a capacidade de extração conforme a sequência  $Al_{CuCl_2} > Al_{LaCl_3} > Al_{KCl}$  foi confirmada por diversos pesquisadores (Aitken, 1992; Coelho et al., 2010; Garcia-rodeja et al., 2004; Hargrove e Thomas, 1984; Matus et al., 2008; Oates e Kamprath 1983a).

Atualmente tem sido observado que os métodos tradicionais de recomendação de calcário têm subestimado a real necessidade do corretivo (Fageria, 2001; Guarçoni; Sobrera, 2017; Teixeira et al., 2020a, 2020b), havendo grandes respostas à calagem em áreas sem ou com baixos teores de  $Al_{KCl}$ , mesmo em locais em que não seria recomendada calagem pelos métodos tradicionais, principalmente, quando o calcário é incorporado profundamente no solo (camada de 0 a 40 cm) (Moraes et al., 2023; Moreira et al., 2024). Juo e Kamprath (1979) foram pioneiros em propor que formas de Al extraídas em  $CuCl_2$  reagem com o calcário, na tentativa de explicar a necessidade de maiores doses de calcário em solos ácidos da América do Sul e África Ocidental. Oates e Kamprath (1983b) estudaram o efeito da calagem, em doses calculadas em função de  $Al_{KCl}$ ,  $Al_{LaCl_3}$  e  $Al_{CuCl_2}$ . Após a correção, verificaram que quando foi utilizado o  $Al_{KCl}$  como critério de cálculo da NC, o pH permaneceu abaixo de 5,0 e maiores valores de m % foram observados, enquanto os valores de m % foram menores quando na NC utilizaram o  $Al_{CuCl_2}$ . Os resultados indicaram que o calcário reagiu simultaneamente com o Al facilmente trocável e com o Al não trocável em KCl. Da mesma forma, evidências de que o  $Al_{CuCl_2}$  está relacionado com a capacidade tampão de pH do solo foi compartilhada por Aitken (1992). No Brasil, os estudos conduzidos por Ernani, Nascimento e Oliveria (1998) e Zambrosi, Alleoni e Caires et al. (2007) também mostraram reduções significativas das quantidades de Al extraídas em  $CuCl_2$  em função da calagem.

A calagem em doses elevadas em muitos casos não torna os solos alcalinos (Moraes et al., 2023, Moreira et al., 2024) e isso coloca em questionamento o real poder tampão desses solos e a capacidade do extrator KCl em extrair toda a quantidade de  $Al^{3+}$  que reage com o

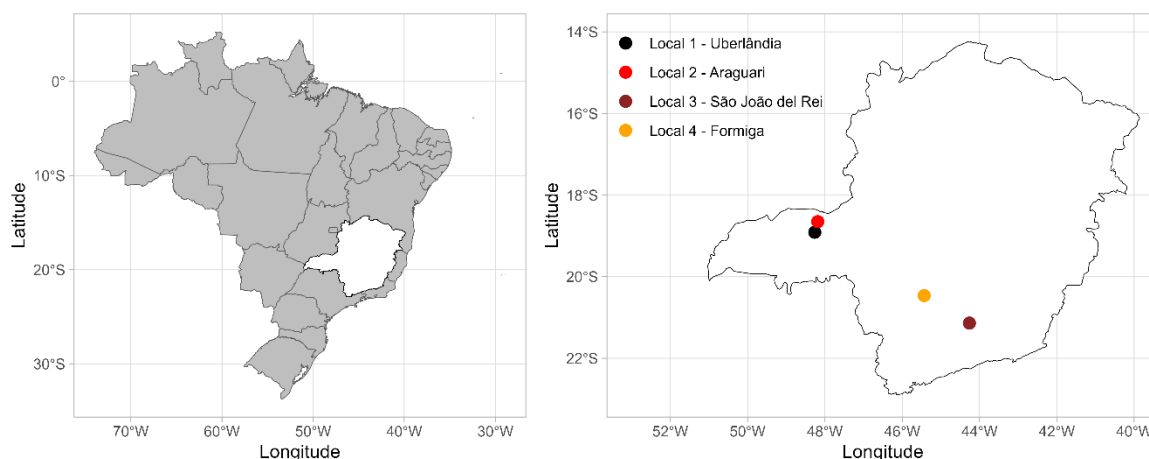
calcário. Diante dos fatos apresentados, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito da calagem em doses superiores às recomendações oficiais, de forma incorporada a 40 cm sobre a acidez do solo (ativa e potencial), formas de Al organicamente complexadas e a relação entre essas variáveis e o rendimento das culturas em áreas no processo de conversão de pastagens e/ou eucalipto para o estabelecimento de culturas anuais em de plantio direto. As hipóteses são que i) a calagem incorporada de forma profunda alivia a acidez do solo no perfil do solo e afeta positivamente o rendimento de grãos; ii) a calagem afeta o estoque potencialmente reativo de Al no solo, reduzindo formas trocáveis e não trocáveis no solo; iii) o reservatório de Al potencialmente reativo influencia a capacidade tampão do solo e afeta as taxas de variação de pH em função da calagem.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização geográfica e climática dos locais dos experimentos

Os experimentos foram instalados entre dezembro de 2018 e outubro de 2019, de forma independente, em quatro fazendas comerciais em municípios de Minas Gerais, conforme a Figura 1, assim identificados: Fazenda Palma da Babilônia - Local 1 – Uberlândia, MG ( $18^{\circ} 54' 41''$  S,  $48^{\circ} 15' 44''$  O, altitude 843 m); Fazenda Fundão - Local 2 – Araguari, MG ( $18^{\circ} 39' 4''$  S,  $48^{\circ} 11' 7''$  O, altitude 940 m); Fazenda Curtume - Local 3 – São João del Rei, MG ( $21^{\circ} 81' 11''$  S,  $44^{\circ} 15' 43''$  O, altitude de 904 m) e Fazenda Massaroca - Local 4 – Formiga, MG ( $20^{\circ} 27' 42''$  S,  $45^{\circ} 25' 58''$  O, altitude de 832 m).

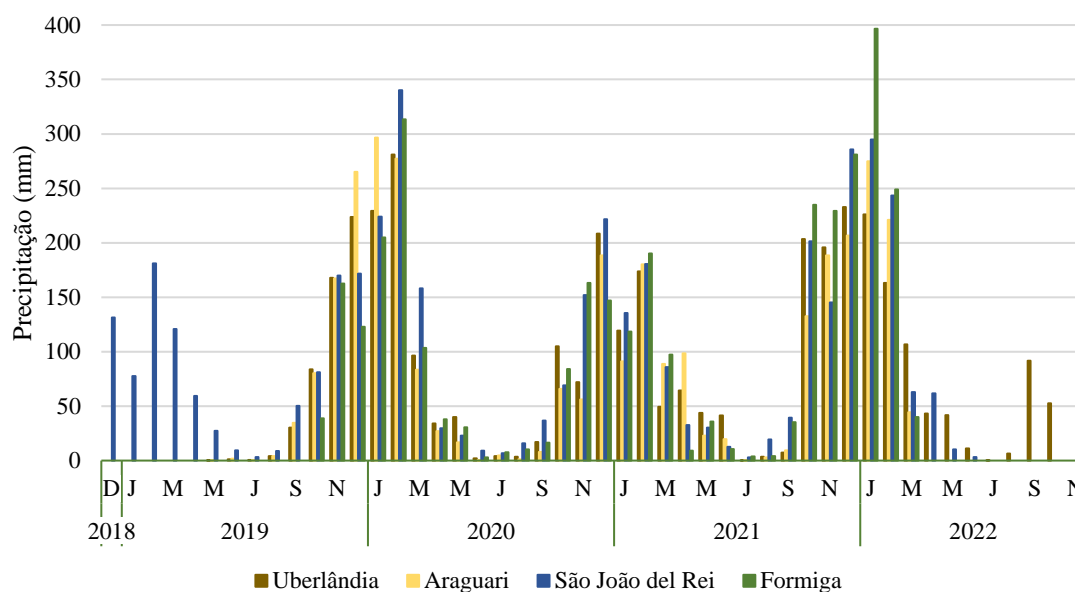
Figura 1 - Localização dos municípios de condução dos experimentos.



Fonte: Do autor (2024)

No local 1, a classificação climática, segundo Koppen-Geiger é Cwa, com inverno seco e verão quente. A temperatura média anual é de  $20,9^{\circ}$  C e a precipitação anual é 1524 mm. No local 2, o clima é classificado como Aw. A temperatura média anual é de  $21,4^{\circ}$  C e a precipitação acumulada ao longo do ano é de 1520 mm. Os locais 3 e 4 são classificados quanto ao clima em Cwb, com temperaturas médias anuais de  $17,9$  e  $19,5^{\circ}$  C e precipitações anuais de 1575 e 1623 mm, respectivamente (Alvarez et al., 2014). A Figura 2 mostra o acumulado de chuvas observado em cada local desde a data de instalação dos experimentos até a amostragem de solos, realizada no ano de 2022. O volume acumulado foi de, aproximadamente, 3483 (Local 1), 3161 (Local 2), 4226 (Local 3) e 3382 mm (Local 4) (NASA POWER, 2024).

Figura 2 - Precipitação ocorrida entre a instalação do experimento e a amostragem de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do NASA POWER (2024)

## 2.2 Caracterização dos solos

Antes da implantação dos experimentos, as áreas dos Locais 1, 2 e 3 estavam sob pastagens degradadas e não tinham sido cultivadas com grãos ou recebido qualquer correção de solo nos últimos 20 anos, enquanto o Local 4 era cultivado com eucalipto com baixa utilização de insumos. Todos os locais estavam em fase de conversão para o sistema de produção de grãos. Os solos das áreas foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) como Latossolo Vermelho Amarelo franco arenoso (Local 1), Latossolo Vermelho argiloso (Local 2 e Local 3) e Latossolo Vermelho Amarelo (Local 4) e Typic Hapludox de acordo com a Soil Taxonomy (Soil survey staff, 2014). As características químicas dos solos antes da implantação dos experimentos são apresentadas na Tabela 1. Os procedimentos para análise seguiram as metodologias descritas por Teixeira et al. (2017). Na Tabela 2, são apresentados o conteúdo de argila, silte e areia dos solos e a classificação textural.

Tabela 1 - Propriedades químicas dos solos antes da instalação dos experimentos.

Profundidade	pH	P	S	K	Ca	Mg	Al	H + Al	CTC	V%	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	H <sub>2</sub> O	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					----- % -----	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
Local 1																
0 – 20	5,3	0,2	3,5	22,5	1,2	0,5	0,2	1,8	3,6	49,7	1,5	0,1	0,8	54,5	27,4	1,1
20 – 40	5,0	0,2	2,7	11,3	1,2	0,3	0,2	1,6	3,1	49,0	1,2	0,1	0,7	54,7	18,1	0,5
40 - 60	5,4	0,6	2,2	11,3	0,9	0,3	0,1	1,5	3,0	41,0	0,9	0,1	0,6	54,9	15,7	0,3
Local 2																
0 – 20	5,1	6,8	11,9	102,0	1,2	1,1	0,6	5,3	7,9	32,7	3,3	0,1	7,3	89,7	25,6	1,0
20 – 40	5,0	6,8	6,1	49,3	0,8	0,6	0,8	4,5	6,0	25,5	2,8	0,1	7,3	85,7	16,2	0,4
Local 3																
0 – 20	5,0	0,2	7,8	33,9	1,1	0,4	0,2	3,7	5,3	30,2	3,4	0,3	1,1	45,1	9,9	0,5
20 – 40	4,7	0,2	7,2	22,4	0,9	0,2	0,2	3,2	4,4	26,8	3,7	0,2	1,0	39,6	6,1	0,3
Local 4																
0 – 20	4,5	0,4	11,4	17,5	0,9	0,1	1,4	7,0	8,1	13,2	3,3	0,2	0,4	75,3	4,5	0,5
20 – 40	4,7	0,1	8,8	13,5	0,8	0,1	1,4	5,8	6,8	14,2	3,1	0,2	0,4	77,3	4,0	0,4

pH - pH em água (1:2,5 solo/solução); MO - matéria orgânica do solo (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 mol L<sup>-1</sup>); K mehlich-1; Ca, Mg e Al (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); (H+Al) - acidez potencial (SMP). CTC - capacidade de troca catiônica em pH 7,0 obtida somando Ca, Mg, K e H+Al (Teixeira et al., 2017).

Fonte: Do autor (2024)

Tabela 2 - Distribuição percentual das frações silte, argila e areia e a classificação textural dos solos do experimento.

<b>Profundidade</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>	<b>Classificação textural</b>
<b>cm</b>	<b>%</b>			
Local 1				
0 – 20	15,0	9,1	75,9	Franco-arenosa
20 – 40	17,2	11,3	71,5	Franco-arenosa
40 – 60	22,0	12,1	65,9	Franco argilo arenosa
Local 2				
0 – 20	51,9	38,1	10,0	Argilosa
20 – 40	56,9	34,1	9,0	Argilosa
Local 3				
0 – 20	63,8	25,6	10,6	Muito argilosa
20 – 40	64,0	25,2	10,8	Muito argilosa
Local 4				
0 – 20	60,8	11,3	27,9	Muito argilosa
20 – 40	61,8	8,7	29,5	Muito argilosa

Fonte: Do autor (2024)

### **2.3 Delineamento experimental e condução**

Os experimentos foram conduzidos utilizando-se um delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições e seis tratamentos, compostos por doses de calcário (0, 4, 8, 12, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>), a exceção do local 4, em que foram aplicadas duas doses adicionais (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 Mg ha<sup>-1</sup>). Cada parcela experimental tinha 10 m de largura e 20 m de comprimento, enquanto para coleta de dados, foram desprezados dois metros de cada lado, tomando como área útil a faixa central.

O calcário foi aplicado de forma mecanizada com o distribuidor Bruttus®, que realiza a distribuição de sólidos com princípio gravitacional, minimizando-se as perdas por deriva. A incorporação do calcário foi realizada após a aplicação, com duas passadas de grade aradora (16 discos de 32”, espaçados em 360 mm), seguidas de duas passadas de grade niveladora (44 discos de 22”, espaçados em 200 mm). As parcelas que continham o tratamento controle (0 Mg ha<sup>-1</sup>) também foram submetidas ao revolvimento de solo, assim como os demais tratamentos. Após a aplicação de calcário no Local 1 (23/05/2019), Local 2 (22/05/2019), Local 3

(12/12/2018) e Local 4 (15/10/2019) não houve reaplicação de corretivos de acidez de nenhuma natureza e nenhuma prática de revolvimento do solo. A composição química e a distribuição granulométrica das partículas dos calcários utilizados estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características químicas e granulométricas dos calcários utilizados.

ABNT 10 <sup>1</sup>	ABNT 20 <sup>2</sup>	ABNT 50 <sup>3</sup>	RE	PN	PRNT	CaO	MgO
%							
Locais 1 e 2							
99,9	97,6	80,4	91,2	108,6	99,9	32,8	17,6
Local 3							
100,0	96,5	77,3	89,5	103,1	92,3	31,7	9,5
Local 4							
99,1	94,3	70,2	85,6	99,9	85,6	43,0	10,3

<sup>1,2,3</sup>Conteúdo passante nas peneiras de 2 mm, 0,84 mm e 0,3 mm, respectivamente. Reatividade (RE), Poder de Neutralização (PN) e Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT).

Fonte: Do autor (2024)

Existem na região duas safras por ano, localmente denominadas como safra de verão (outubro a fevereiro) e safra de inverno (fevereiro a agosto) (Moreira et al., 2023) e como os experimentos foram implantados em área comercial, as culturas utilizadas após a aplicação dos tratamentos foram as mesmas utilizadas nas glebas comerciais dos produtores. Após a instalação do experimento, a escolha das culturas implantadas nas safras de 2019/20 a 2022/22, incluindo datas de semeadura, escolha de cultivares e adubações, controle de pragas, manejo de plantas daninhas e doenças foram seguidos de acordo com os manejos adotados pelos produtores. O histórico de cultivo, cultivares utilizados, datas de semeadura, colheita e adubação realizadas ao longo das safras nos quatro locais são apresentados na Tabela 4. As culturas cultivadas durante o experimento foram: soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e sorgo granífero (*Sorghum bicolor*).

As culturas descritas na Tabela 4 foram semeadas a uma profundidade de 0,03-0,05 m, com deposição de fertilizantes a cerca de 0,10-0,12 m de profundidade. A semeadura foi feita de forma mecanizada (JD 1113®), com espaçamentos de 50 cm (Locais 1, 2 e 4) e 60 cm (Local 3). As operações de semeadura nas culturas de primeira safra foram realizadas cerca de 10-15 dias após a dessecação das plantas daninhas. As culturas da safra de inverno (sorgo), cultivadas

apenas no Local 2, foram semeadas imediatamente após a colheita das culturas da safra de verão.

A colheita dos experimentos foi feita no centro das parcelas, desprezando-se as bordaduras, com a retirada de três linhas de cinco metros de comprimento. Foi padronizada a umidade dos grãos para 13% e definida a produtividade da área por parcela. No presente estudo, os resultados de produtividade foram estudados com base na produção relativa de cada parcela, dada pela fórmula:  $PR = ((\text{Produtividade } i\text{-ésima parcela}) / (\text{Máxima produtividade observada})) * 100$ . A produtividade acumulada foi determinada pelo somatório das médias de produtividades, por tratamento, registradas desde a instalação do experimento até a safra 2022/22.

Tabela 4 - Informações das culturas, datas de plantio e colheita e histórico de adubações nos locais dos experimentos.

(Continua)

Safra	Cultura	Cultivar	Densidade (plantas ha <sup>-1</sup> )	Plantio	Colheita	Adubo NPK	Dose Kg ha <sup>-1</sup>	Época de adubação
Local 1								
2019/20	Soja	NS 7901	300000	01/11/2019	07/03/2020	11-54-00	180,0	Plantio
						00-00-58	160,0	Cobertura
2020/21	Soja	5G 8015	240000	10/12/2020	09/04/2021	11-54-00	180,0	Plantio
						00-00-58	135,0	Cobertura
2021/22	Soja	CZ 37b43	194000	04/11/2022	04/03/2022	05-37-15	200,0	Plantio
						00-00-58	120,0	Cobertura
Local 2								
2019/20	Soja	NS 7709	250000	24/10/2019	21/02/2020	05-25-25	300,0	Plantio
						05-25-25	100,0	Cobertura
2020/20	Sorgo	Nugrain 430	245000	15/03/2020	21/07/2020	05-25-25	300,0	Plantio
						32-00-00	230,0	Cobertura
2020/21	Soja	NS 7709	280000	04/11/2020	06/03/2021	08-28-16	400,0	Plantio
2021/21	Sorgo	Nugrain 430	220000	10/03/2021	09/08/2021	05-25-25	200,0	Plantio
						46-00-00	200,0	Cobertura
2021/22	Soja	FT 3868	196000	05/11/2021	10/03/2022	04-24-24	400,0	Plantio
2022/22	Sorgo	K 200	200000	20/03/2022	06/08/2022	16-16-16	250,0	Plantio
						46-00-00	100,0	Cobertura
Local 3								

Tabela 4 - Informações das culturas, datas de plantio e colheita e histórico de adubações nos locais dos experimentos.

(Conclusão)

Safra	Cultura	Cultivar	Densidade (plantas ha <sup>-1</sup> )	Plantio	Colheita	Adubo NPK	Dose Kg ha <sup>-1</sup>	Época de adubação
2019/20	Soja	RK 7518	-	28/11/2019	-	11-54-00	260,0	Plantio
						00-00-58	300,0	Cobertura
2020/21	Soja	KWS 8115	220000	27/11/2020	16/04/2021	13-33-00	130,0	Plantio
						00-00-58	200,0	Cobertura
2021/22	Milho	P 4285	72000	22/11/2021	05/05/2022	10-46-00	170,0	Plantio
						46-00-00	200,0	Cobertura
						00-00-58	200,0	Cobertura
Local 4								
2020/20	Milho	P 4285	60000	22/02/2020	-	11-54-00	300,0	Plantio
						32-00-00	100,0	Plantio
						00-00-58	150,0	Plantio
						32-00-00	100,0	Cobertura
2020/21	Soja	AS 3730	280000	26/11/2020	31/03/2021	09-38-00	243,0	Plantio
						32-00-00	300,0	Cobertura
2021/22	Soja	AS 3730	190000	06/11/2021	17/03/2022	09-39-00	200,0	Plantio
						00-00-58	200,0	Cobertura

Fonte: Do autor (2024)

## 2.4 Coleta e Análises de solos

As amostras de solos foram retiradas nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, após a colheita da cultura de verão em 2022, usando trado holandês de cinco centímetros de diâmetro. No local 1, em função da textura mais arenosa (~ 15% de argila), também foram retiradas amostras na profundidade de 40-60 cm. Foram retiradas cinco subamostras por parcela, formando-se uma amostra composta em cada profundidade. As amostras devidamente identificadas foram secas em estufa a 40° C e passadas em peneira de 2 mm, para a obtenção da TFSE – Terra Fina Seca em Estufa.

As amostras de solos foram analisadas seguindo-se os procedimentos recomendados por Teixeira et al. (2017). O pH foi determinado em H<sub>2</sub>O, na proporção 1:2,5 de solo:solução. A acidez potencial (H+Al) foi estimada de forma indireta usando o tampão SMP e valores correlacionados na curva de determinação em acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> tamponada em pH 7,0. Os procedimentos analíticos para determinação das quantidades extraíveis de Al foram realizados conforme descrito abaixo:

Alumínio extraído por cloreto de potássio (Al<sub>KCl</sub>): 5 g de solo foram pesadas e agitadas com 50 ml de solução KCl 1 mol L<sup>-1</sup> por 5 min. Após a agitação, as amostras foram deixadas em repouso por 16 h. Alíquotas do sobrenadante foram coletadas e a determinação dos teores trocáveis de Al<sup>3+</sup> foram feitas por meio da Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Essa extração corresponde à fração trocável de alumínio no solo, que se encontra em equilíbrio com a solução do solo. A metodologia utilizada seguiu as orientações de Teixeira et al. (2017). Ao longo do texto, as menções de alumínio, Al, Al<sup>3+</sup> ou Al<sub>KCl</sub> se referem à mesma fração trocável extraída em KCl.

Alumínio extraído por cloreto de cobre (Al<sub>CuCl<sub>2</sub></sub>): 3 g de solo foram pesadas e agitadas, em mesa agitadora horizontal a 150 rpm, com 30 ml de solução CuCl<sub>2</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> por 5 min. Após a agitação, as amostras permaneceram em repouso por 12 horas. No dia seguinte, as amostras foram novamente agitadas por 30 min e, em seguida, filtradas em papéis de filtro lavado em ácido (HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>). O volume do extrato foi completado para 50 ml com solução CuCl<sub>2</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Uma alíquota foi retirada e diluída em água ultrapura na proporção de 1:10 para facilitar a leitura das concentrações, devido ao excesso de cobre nas amostras. A determinação dos teores foi feita por meio do ICP-OES. Essa metodologia foi baseada nos relatos de Juo e Kamprath (1979) e adaptações encontradas nos trabalhos de Coelho et al. (2010) e Garcia-rodeja et al. (2004).

Alumínio não trocável ( $Al_{CuCl_2} - Al_{KCl}$ ): a fração denominada “não-trocável” foi obtida pela subtração entre os teores obtidos nas extrações de  $CuCl_2$  e  $KCl$ . A diferença entre as quantidades extraídas corresponde à fração de alumínio complexado na matéria orgânica do solo e representa o reservatório de Al potencialmente reativo (Zambrosi; Alleoni; Caires, 2007).

A saturação por alumínio (m %) foi obtida em função da participação percentual de  $Al^{3+}$  na CTC efetiva do solo (t), em que o t, corresponde ao somatório de  $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+}$ , pela fórmula:  $m \% = (Al^{3+} / t) * 100$ .

## ***2.5 Análise dos dados***

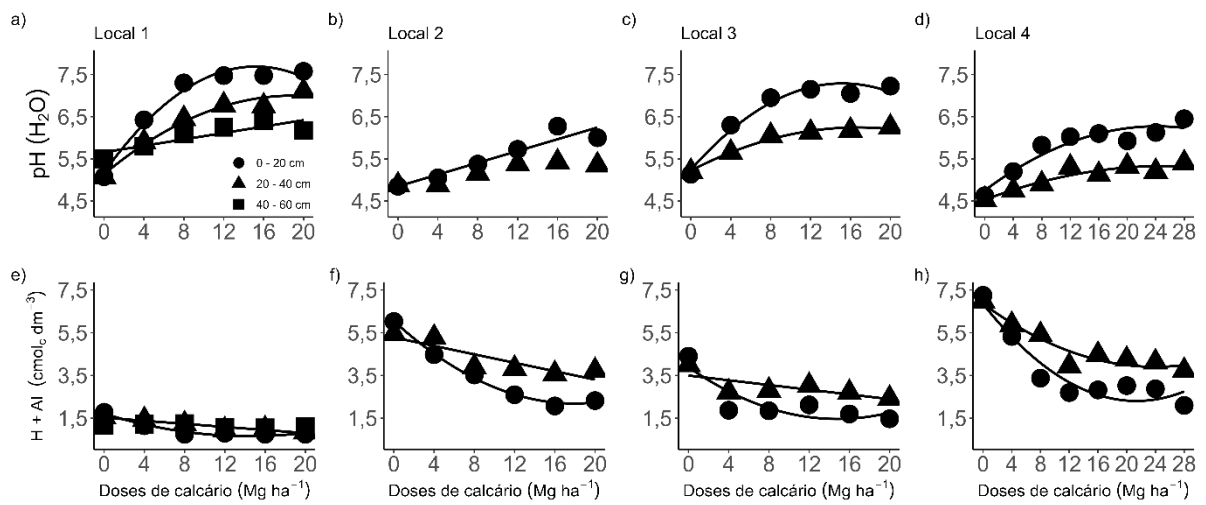
Os dados obtidos foram tabulados em planilhas excel e as análises estatísticas foram realizadas nos softwares R (R CORE TEAM ,2022) e Jamovi (THE JAMОВI PROJECT, 2022). Os dados foram submetidos à análise de variância, considerando-se o delineamento em blocos ao acaso, e, quando encontradas diferenças significativas, fez-se o estudo da regressão em função dos tratamentos. Também foram feitas análises de regressão entre variáveis como pH e Al extraído em  $KCl$  e  $CuCl_2$  e as relações entre Al em  $CuCl_2$  e H+Al, assim como os teores de Al não trocável e o conteúdo de MO do solo. As produtividades de cada local foram agrupadas e analisadas em termos de produção acumulada. Somente foram considerados os modelos significativos ao nível de 5% (p valor < 0,05). Os rendimentos também foram analisados para cada cultivo desde a implantação em termos de produtividade relativa e foi estudada a correlação entre as produtividades e os atributos químicos pH, H+Al, Al e m %. Os resultados foram elaborados na forma de figuras construídas utilizando o pacote tidyverse e funções complementares, também no software R, e, quando conveniente, também foram elaboradas tabelas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Acidez ativa e acidez potencial dos solos

Após 41 (Local 1), 34 (Local 2), 43 (Local 3) e 29 meses (Local 4) da aplicação e incorporação profunda do calcário, os valores de pH variaram em função dos locais, profundidades de amostragens e doses de calcário (Figura 3). Os modelos estatísticos associados às variáveis do presente estudo estão apresentados no Apêndice A deste capítulo.

Figura 3 - Valores de pH e H+Al em função das doses de calcário, em diferentes locais.



Fonte: Do autor (2024)

As doses de calcário aumentaram os valores de pH do solo em todos os locais, com exceção dos valores observados na profundidade de 20-40 cm do solo do Local 2 (Figura 3b). Na profundidade de 0-20 cm, o melhor ajuste às médias observadas foi obtido com o modelo quadrático nos locais 1, 3 e 4 (Figuras 3a, 3c e 3d) e com o linear no Local 2 (Figura 3b). O pH máximo nessa profundidade foi estimado em 7,7 (Local 1), 6,2 (Local 2), 7,3 (Local 3) e 6,3 (Local 4), nas doses de 15,2, 20,0, 15,2 e 24,3, respectivamente  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

Como esperado, a acidez potencial (H+Al) apresentou comportamento inverso ao observado para os valores de pH, com redução em função do aumento das doses aplicadas. Somente as médias observadas na profundidade de 40-60 cm no Local 1 (Figura 3e) não se diferenciaram do tratamento controle. O H+Al apresentou maior redução na profundidade de 0-20 cm. No entanto, mesmo nas maiores doses e nas situações em que o pH atingiu a alcalinidade (locais 1 e 3), a acidez potencial não foi totalmente eliminada. Em 0 a 20 cm, as estimativas dos modelos quadráticos foram de valores mínimos de 0,7 (Local 1), 2,2 (Local 2), 1,5 (Local 3) e 2,3  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Local 4), para as doses de 14,3, 18,0, 14,9 e 21,3  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

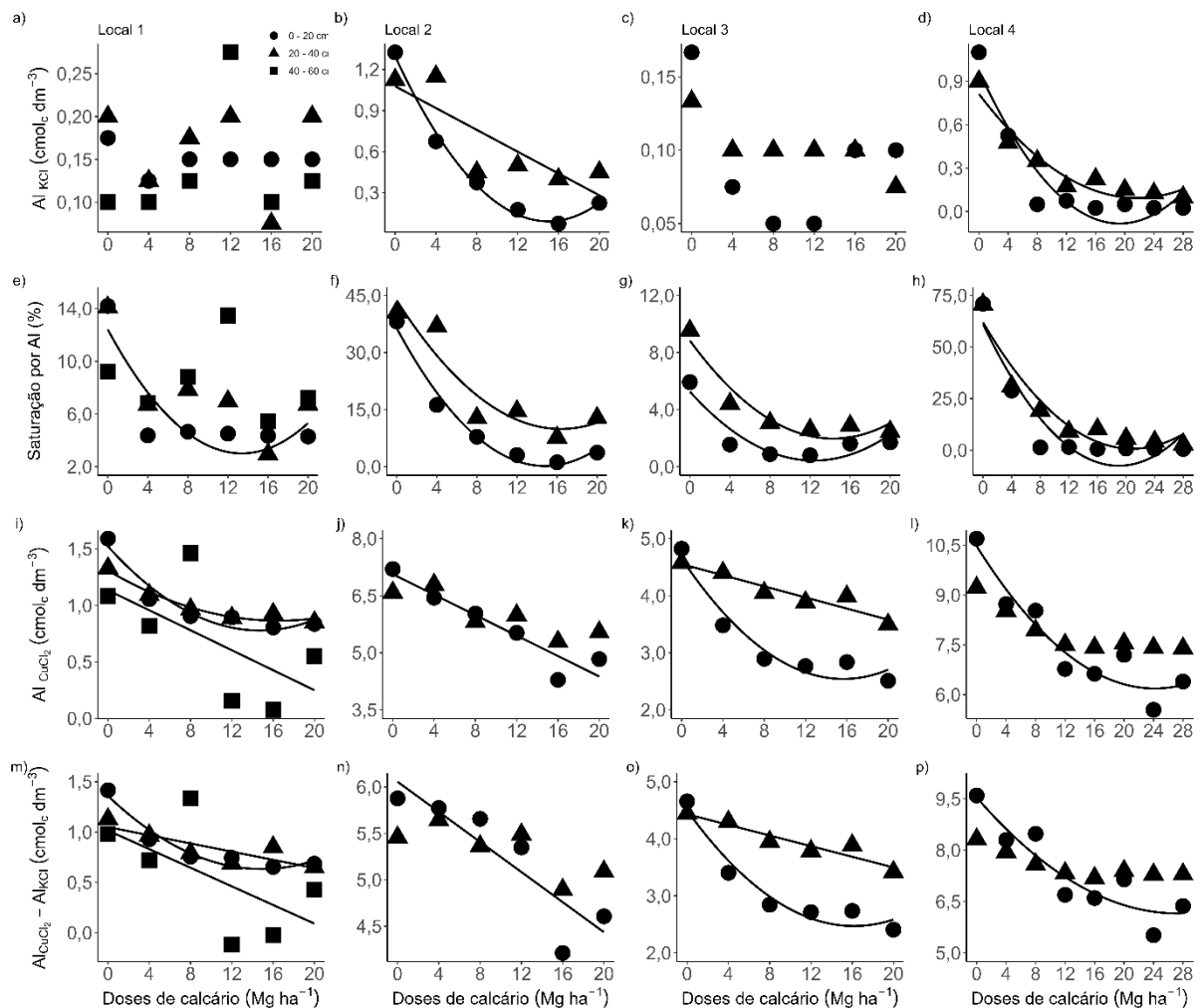
### ***3.2 Efeito da calagem sobre o alumínio trocável e não trocável***

De maneira geral, as doses de calcário reduziram os teores de  $\text{Al}^{3+}$ , a m % e as quantidades  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  (Figura 4). Por consequência, a fração não trocável de Al também foi reduzida. Os menores teores de  $\text{Al}_{\text{KCl}}$  em todo o perfil de solo analisado foram observados no Local 1 (0,15) e Local 3 (0,10  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) (Figuras 4a e 4c). Por sua vez, os teores de  $\text{Al}^{3+}$  no tratamento controle dos locais com os maiores teores foram de 1,33 (Local 2) e 1,10  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Local 4), sendo reduzidos com o aumento das doses (Figuras 4b e 4d). Da mesma forma e de maneira expressiva, os maiores teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  foram extraídos nos solos do Local 2 (7,2) e Local 4 (10,7  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ).

Os teores de  $\text{Al}^{3+}$  trocáveis do Local 1 não foram afetados pela calagem em nenhuma das profundidades amostradas, mas se mantiveram praticamente constantes e abaixo de 0,2  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  até 60 cm de profundidade (Figura 4a). No Local 2, a calagem reduziu o Al trocável em ambas as camadas, com teor mínimo de 0,1  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , observado na camada de 0-20 cm, quando foi aplicada a dose de 16,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  (Figura 4b). Na camada de 20-40 cm, houve redução linear dos teores, porém, na dose máxima, ainda foram encontrados teores médios de 0,5  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . De forma similar ao que foi relatado no Local 1, os teores de Al no Local 3 foram muito baixos e constantes ao longo do perfil de 0-40 cm do solo e não foram afetados pelas doses de calcário aplicadas (Figura 4c). No Local 4, a calagem reduziu o  $\text{Al}^{3+}$  nas duas camadas

amostradas (Figura 4d). Na camada de 0-20 cm, doses  $\geq 8$  Mg ha<sup>-1</sup> promoveram a neutralização do Al<sup>3+</sup>, os quais oscilaram entre 0,0 e 0,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Na profundidade de 20-40 cm as reduções seguiram um padrão similar ao observado na camada superficial, com pouca alteração a partir da dose de 12,0 Mg ha<sup>-1</sup>. No entanto, mesmo com a aplicação das doses mais elevadas de calcário, os teores de Al<sub>KCl</sub> não foram completamente zerados, sendo, em média, de 0,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

Figura 4 - Teores de alumínio extraídos em KCl (Al<sub>KCl</sub>), saturação por alumínio (m%), alumínio extraído em CuCl<sub>2</sub> (Al<sub>CuCl<sub>2</sub></sub>) e alumínio não trocável (Al<sub>CuCl<sub>2</sub></sub> - Al<sub>KCl</sub>), em função de doses de calcário nos diferentes locais.



Fonte: Do autor (2024)

A m % também foi reduzida com a calagem. No Local 1, valores de m % máximos de 14,2 (0-20 cm), 14,1 (20-40 cm) e 13,5 % (40-60 cm) foram observados nos tratamentos sem aplicação de calcário (Figura 4e). Na camada superficial, doses  $\geq 4,0$  Mg ha<sup>-1</sup> apresentaram

efeito similar na redução da  $m\%$ , apresentando valores médios de  $4,4\%$ . Os valores de  $m\%$  observados reduziram de  $38,2$  (0-20 cm) e  $40,6\%$  (20-40 cm) no controle para  $1,2$  (0-20 cm) e  $7,7\%$  (20-40 cm), quando a dose de  $16,0\text{ Mg ha}^{-1}$  foi aplicada. Os máximos valores de  $m\%$  observados no Local 3 foram  $5,9$  (0-20 cm) e  $9,5\%$  (20-40 cm) no tratamento sem aplicação de calcário, os quais foram acentuadamente reduzidos com as doses aplicadas (Figura 4g). No Local 4, os valores médios de  $m\%$  de ambas as profundidades do solo foram de cerca de  $71\%$  nas parcelas sem aplicação de corretivo, sendo os maiores em comparação com os demais locais (Figura 4h). A calagem reduziu significativamente o valor de  $m\%$  nas duas profundidades, atingindo valores  $\leq 2,0\%$  a partir de  $8\text{ Mg ha}^{-1}$  (0-20 cm) e  $\leq 5,0\%$  a partir de  $20\text{ Mg ha}^{-1}$  (20-40 cm).

As quantidades de Al extraídos por  $\text{CuCl}_2$  foram inversamente relacionadas com as doses de calcário aplicadas e muito superiores aos valores encontrados na extração com KCl (Figuras 4i, 4j, 4k e 4l). No Local 1, os teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  da camada de 0-20 cm reduziram de  $1,6\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$  no tratamento sem calcário para  $0,8\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$  quando doses  $\geq 16,0\text{ Mg ha}^{-1}$  foram aplicadas (Figura 4i). Analisando a dispersão dos dados, é possível notar que a extração praticamente se estabilizou a partir de doses  $\geq 8,0\text{ Mg ha}^{-1}$ , com variação de apenas  $0,1\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$ . Na camada de 20-40 cm, as quantidades seguiram um padrão semelhante ao observado na camada superior, com uma redução quadrática ajustada aos dados observados. Os menores teores, no entanto, foram quantificados em 40-60 cm de profundidade, com redução linear em função do aumento das doses. Por sua vez, nos locais 2 e 4, a calagem reduziu os teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  apenas na camada de 0-20 cm (Figuras 4j e 4l). No Local 2, houve redução linear dos teores de  $7,2$  (tratamento controle) para  $4,4\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$  ( $20,0\text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Figura 4j). No local 4, o teor de  $10,7\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$  na ausência da calagem foi reduzido para  $5,5\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$ , com a dose de  $24\text{ Mg ha}^{-1}$ . No Local 3, a redução dos teores de Al em  $\text{CuCl}_2$  pela calagem foi observada em ambas as profundidades. A calagem explicou  $93$  (0-20 cm) e  $90\%$  (20-40 cm) das variações observadas nas quantidades extraídas, sendo que no tratamento controle, os teores máximos observados foram de  $4,8$  (0-20 cm) e  $4,6\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$  (20-40 cm) (Figura 4k).

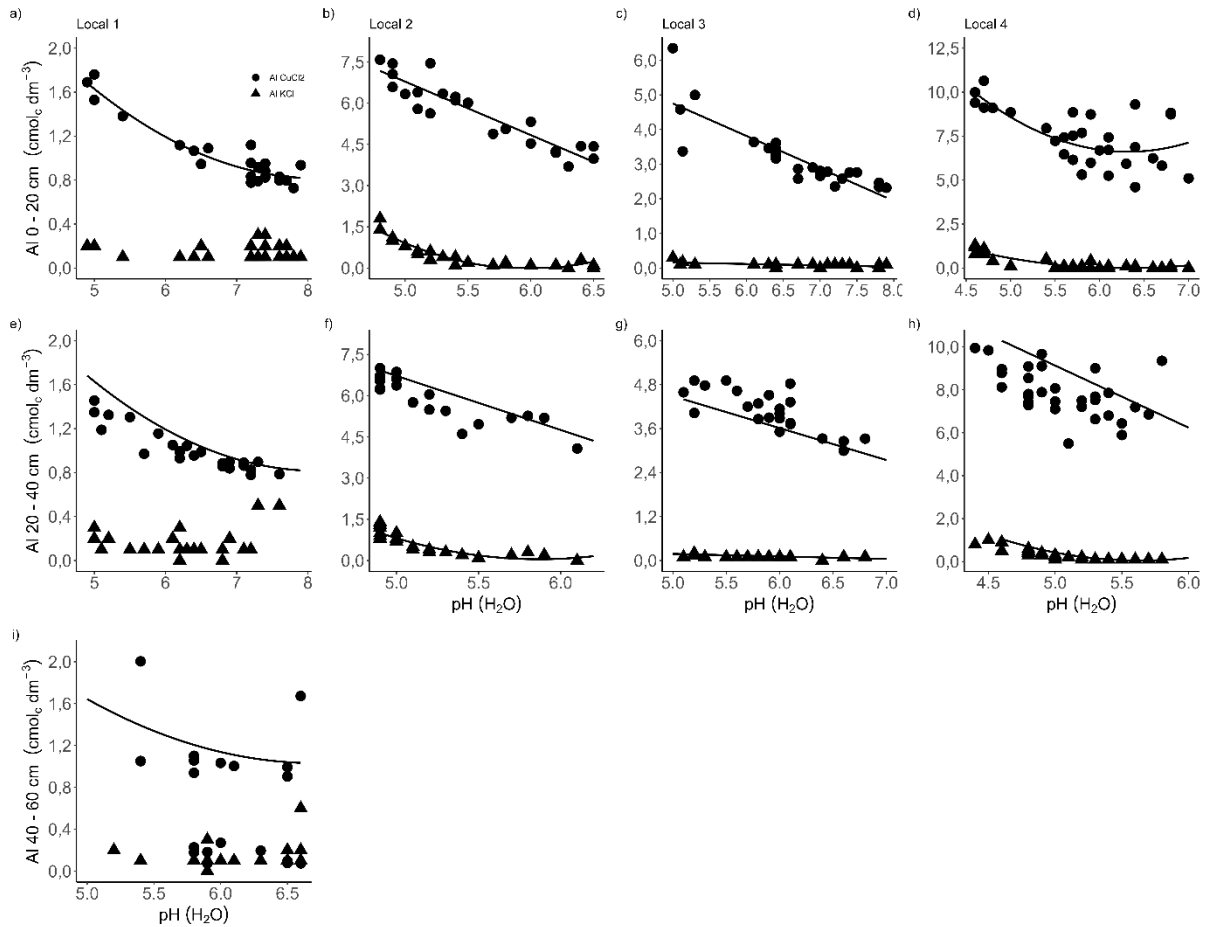
As quantidades de Al não trocável ( $\text{Al}_{\text{CuCl}_2 - \text{KCl}}$ ) também reduziram com a calagem e, assim como os teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$ , somente as quantidades extraídas na camada de 20-40 cm dos Locais 2 e 4 não se diferenciaram do tratamento sem calcário (Figuras 4m, 4n, 4o e 4p). Os teores de Al não trocável representaram  $84,5$  (0-20),  $83,6$  (20-40) e  $39,9\%$  (40-60 cm) de todo o Al extraído em  $\text{CuCl}_2$  no Local 1. No Local 2, essa fração correspondeu a  $92,6$  (0-20) e  $89,0\%$  (20-40 cm). No Local 3, os percentuais de Al não trocável foram de  $97,2$  (0-20) e  $97,5\%$  (20-

40 cm). No Local 4, as quantidades de Al não trocável representaram 97,7 (0-20) e 96,1% (20-40 cm) de todo o Al extraído om a solução de  $\text{CuCl}_2$ .

As quantidades extraídas pelas soluções de  $\text{CuCl}_2$  e  $\text{KCl}$  em função do pH do solo são apresentadas na Figura 5. Esses gráficos reforçam a diferença entre as quantidades extraídas e indica uma relação negativa entre Al, independentemente da forma de extração, e o pH em  $\text{H}_2\text{O}$  das amostras.

No Local 1 não foram observadas variações significativas nas quantidades extraídas de  $\text{Al}^{3+}$  em função do pH em nenhuma das profundidades (Figuras 5a, 5e e 5i). Por outro lado, o  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  reduziu acentuadamente com o aumento de pH e, mesmo em pH superior a 7,0, a solução de  $\text{CuCl}_2$  foi capaz de extrair Al nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. No Local 2, os teores de  $\text{Al}_{\text{KCl}}$  tenderam a se estabilizar a partir do pH 5,5, embora o  $\text{Al}^{3+}$  não tenha sido totalmente eliminado (Figuras 5b e 5f) em nenhuma camada. Por sua vez, os teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  diminuíram linearmente com o a redução da acidez, mas mesmo nos maiores valores de pH do solo nas camadas de 0-20 (pH 6,5) e 20-40 (pH 6,1), teores  $\geq 4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  foram observados. No Local 3, o aumento de pH reduziu linearmente os teores de Al extraídos, independentemente da solução extratora empregada e da profundidade avaliação (Figuras 5c e 5g). Os modelos de regressão para  $\text{Al}_{\text{KCl}}$ , no entanto, em função da estreita faixa de variação dos dados observados, apresentaram baixo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para esse local, em valores de pH  $>5,0$ , os teores de Al em todas as extrações foram  $\leq 0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Na camada de 0-20 cm, a extração média foi de  $2,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  para valores de pH maior que 7,0. No Local 4, de maneira semelhante ao que foi relatado no Local 2, os teores de  $\text{Al}_{\text{KCl}}$  se estabilizaram a partir de pH 5,5 na camada de 0-20 cm, com valores de 0,0 a  $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Na profundidade de 20-40 cm, os teores se mantiveram em  $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  a partir de pH 5,2. Por sua vez, em relação ao  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$ , as estimativas do modelo indicam uma estabilidade nas quantidades extraídas em pH superior a 6,3, porém, os teores ainda foram superiores a  $6,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Por fim, na camada de 20-40, a redução de Al na solução extratora de  $\text{CuCl}_2$  foi linear, com pH variando entre 4,4 e 5,8. Com exceção de apenas duas observações, os demais valores foram sempre superiores a  $6,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nessa profundidade também.

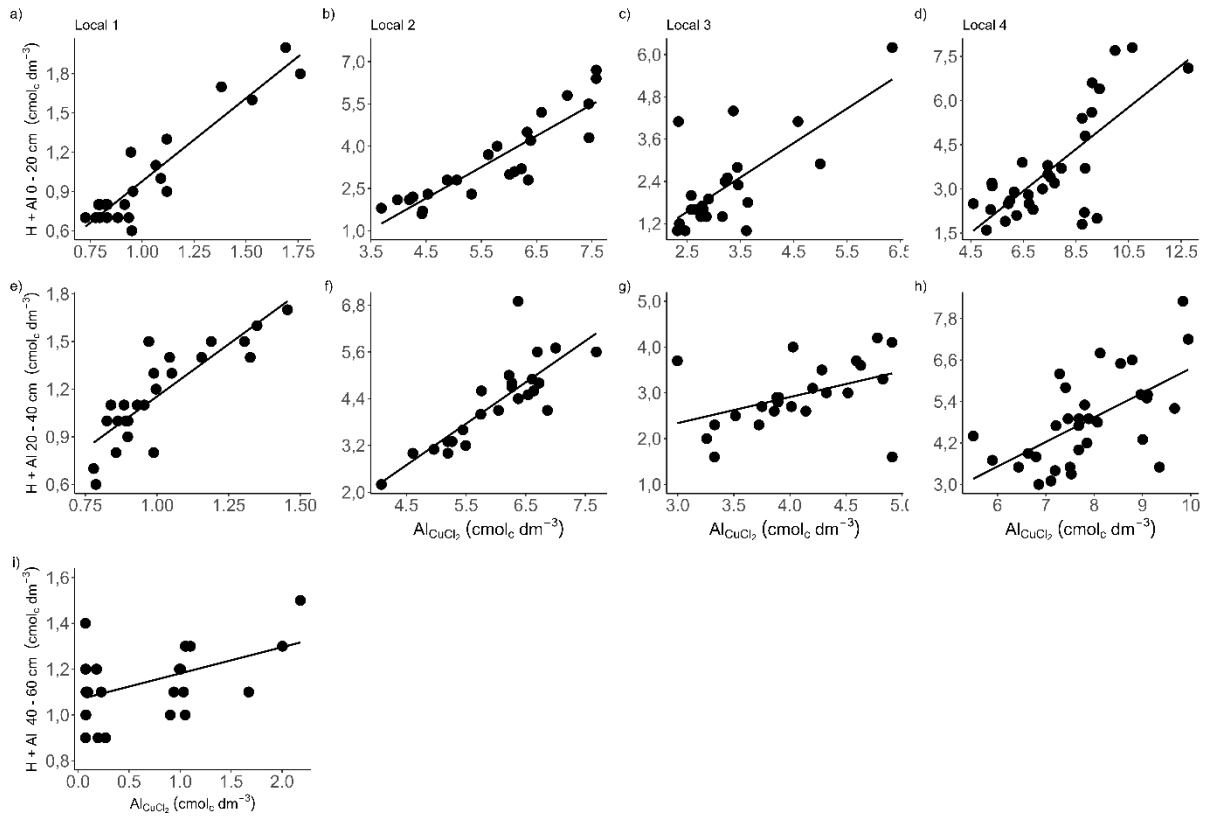
Figura 5 - Quantidades extraídas de alumínio em  $\text{CuCl}_2$  e  $\text{KCl}$  em função do pH do solo, nos diferentes locais.



Fonte: Do autor (2024)

As relações entre as quantidades de Al extraídas em solução  $\text{CuCl}_2$  e a acidez potencial determinada em SMP são apresentadas na Figura 6. As quantidades de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  foram sempre superiores ao somatório da acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e não trocável ( $\text{H}^+$ ). Alterações no conteúdo de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  explicaram significativamente uma parte das variações de acidez potencial nos solos estudados, com  $R^2$  variando de 19 a 87 %. Uma maior dispersão entre os valores observados e valores preditos pelos modelos de regressão foram observados nos locais 3 e 4, mas com  $R^2 \geq 50\%$ . De forma geral, o ajuste dos modelos reduziu com o aumento da profundidade amostrada.

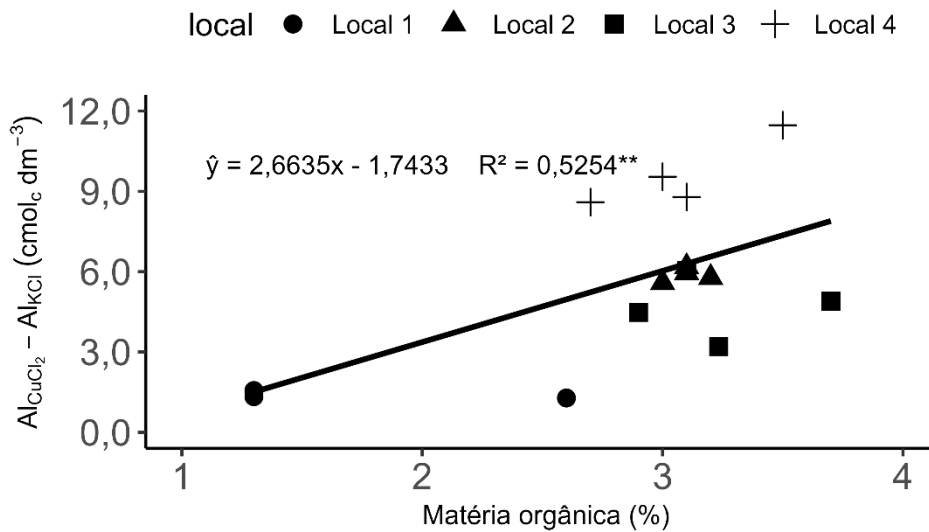
Figura 6 - Relação entre as quantidades de alumínio extraídas em  $\text{CuCl}_2$  e os teores de H+Al estimadas pelo método SMP, nos diferentes locais. Significância do teste de F para o modelo:



Fonte: Do autor (2024)

As relações entre o conteúdo de MO no solo e os teores de Al não trocável ( $\text{Al}_{\text{KCl}} - \text{Al}_{\text{CuCl}_2}$ ) são apresentadas na Figura 7. Devido ao efeito da calagem na redução do  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$ , foram considerados apenas os teores de MO no tratamento controle, sem calagem, dos diferentes locais. Os teores de MO variaram entre os locais, sendo os menores teores encontrados no Local 1, com média ligeiramente superior a 1 %. Nos solos dos locais 2, 3 e 4 os teores de MO foram superiores a 3 %. Observou-se tendência linear nos dados, indicando haver maior teor de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  em solos com maior teor de MO.

Figura 7 - Relação entre os teores de alumínio não trocável e matéria orgânica dos solos dos diferentes locais.



Fonte: Do autor (2024)

### 3.3 Interação dos atributos químicos do solo e a produtividade das culturas

Os coeficientes de correlações de Spearman ( $\rho$ ) entre as variáveis relacionadas à acidez do solo e a produtividade relativa (PR) das culturas, em função do local e ano agrícola são apresentados na Tabela 4. Para essa comparação, foram tomados somente os atributos químicos de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Todas as variáveis apresentaram correlação significativa com a PR das culturas no primeiro cultivo. Nas safras seguintes, os efeitos foram variados em função do local, ano agrícola e profundidade do solo. O pH, quando significativo, sempre apresentou correlação positiva com a PR das culturas. Por sua vez, as correlações entre H+Al, Al trocável e m %, quando significativas, foram negativamente associadas com a PR. Em geral, os atributos químicos na camada de 0-20 cm tenderam a ser mais correlacionados com a PR. As únicas exceções foram as correlações entre H+Al e Al com a PR da safra 2020/21 no Local 1, além das correlações entre o pH do solo do Local 4 com a PR da safra 2021/22.

As produtividades acumuladas de grãos em função das doses de calcário são apresentadas na Figura 8. Com exceção da produtividade acumulada de grãos no Local 3, em todos os locais houve aumentos expressivos de produtividade com o aumento das doses de calcário, com ajuste de modelos de regressão quadrática entre doses e produtividade (Figura 8). No Local 1, a produtividade máxima acumulada foi estimada em 10.826 kg ha<sup>-1</sup>, com a dose de 13,2 Mg ha<sup>-1</sup>, um incremento de 16,1 % no acumulado de três cultivos de soja. No Local 2, onde houve o maior número de cultivos no período, sendo três cultivos de soja nas safras de

verão, seguidos por três cultivos de sorgo nas safras de inverno, a produtividade máxima acumulada foi 21.384kg ha<sup>-1</sup>, na dose de 17,1 Mg ha<sup>-1</sup>, ou seja, 31,5 % maior em relação ao tratamento controle. No Local 3, foram realizadas um cultivo de soja e dois cultivos de milho. Possivelmente, os resultados de produtividade acumulada foram ofuscados pela falta de resposta observada no milho na safra 2021/22. No Local 4, a produtividade máxima acumulada estimada pelo modelo foi de 7.489 kg ha<sup>-1</sup>, na dose de 18,7 Mg ha<sup>-1</sup>, representando um aumento de produção de 240,5 % em relação ao tratamento sem calcário.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre os atributos químicos do solo e a produtividade relativa de diferentes culturas nas diferentes safras e locais estudados.

							(Continua)	
Cultura	Local	Ano agrícola	Profundidade	pH	H + Al	Al	m%	
Soja	Local 1	2019/20	0-20 cm	0,65***	-0,55**	-0,57**	-0,57**	
			20-40 cm	0,55**	-0,53**	-0,59**	-0,69***	
Soja		2020/21	0-20 cm	0,43*	-0,40 NS	-0,21 NS	-0,24 NS	
			20-40 cm	0,35 NS	-0,47*	-0,42*	-0,35 NS	
Soja		2021/22	0-20 cm	-0,09 NS	0,14 NS	0,05NS	0,01 NS	
			20-40 cm	-0,10 NS	-0,06 NS	-0,10 NS	-0,20 NS	
Soja	Local 2	2019/20	0-20 cm	0,75***	-0,74***	-0,83***	-0,83***	
			20-40 cm	0,62***	-0,77***	-0,84***	-0,76***	
Sorgo		2020	0-20 cm	0,80***	-0,80***	-0,83***	-0,83***	
			20-40 cm	0,69***	-0,79***	-0,87***	-0,83***	
Soja		2020/21	0-20 cm	0,70***	-0,65***	-0,68***	-0,62***	
			20-40 cm	0,49*	-0,62***	-0,69***	-0,68***	
Sorgo		2021	0-20 cm	0,28 NS	-0,22 NS	-0,20 NS	-0,20 NS	
			20-40 cm	0,39 NS	-0,25 NS	-0,33 NS	-0,28 NS	
Soja		2021/22	0-20 cm	0,35 NS	-0,35 NS	-0,34 NS	-0,37 NS	
			20-40 cm	0,33 NS	-0,32 NS	-0,40 NS	-0,39 NS	
Sorgo		2022	0-20 cm	0,43*	-0,45*	-0,45*	-0,41*	
			20-40 cm	0,29 NS	-0,31 NS	-0,28 NS	-0,36 NS	
Soja	Local 3	2020/21	0-20 cm	0,64***	-0,64***	-0,56**	-0,56**	
			20-40 cm	0,61**	-0,50*	-0,48*	-0,48*	
Milho		2021/22	0-20 cm	-0,34 NS	0,11 NS	-0,10 NS	0,10 NS	
			20-40 cm	-0,38 NS	-0,13 NS	0,09 NS	0,25 NS	

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre os atributos químicos do solo e a produtividade relativa de diferentes culturas nas diferentes safras e locais estudados.

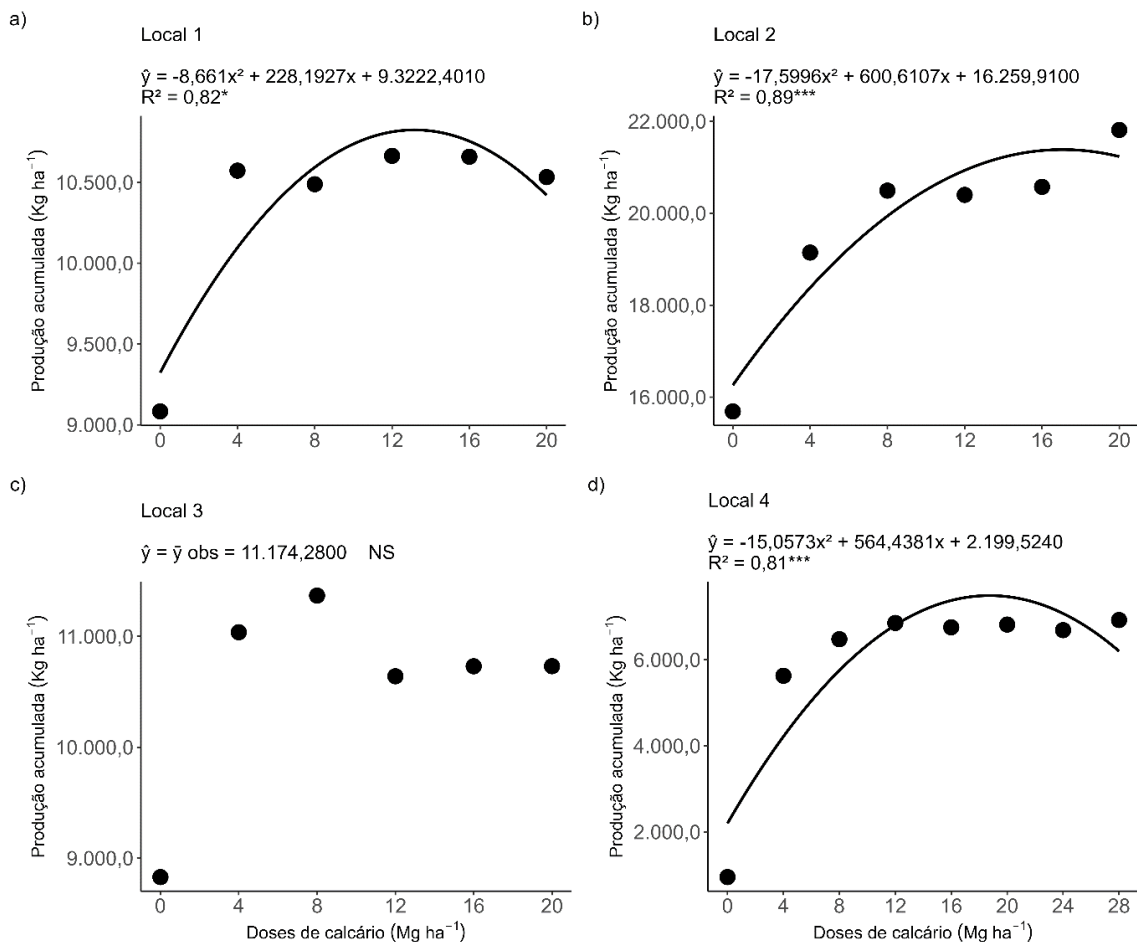
(Conclusão)

Cultura	Local	Ano agrícola	Profundidade	pH	H + Al	Al	m%
Soja	Local 4	2020/21	0-20 cm	0,57***	-0,57***	-0,59***	-0,57***
			20-40 cm	0,46**	-0,44*	-0,52**	-0,51**
Soja		2021/22	0-20 cm	0,25 NS	-0,40*	-0,63***	-0,59***
			20-40 cm	0,41*	-0,38*	-0,46**	-0,52**

Significância do teste de F: NS (não significativo);  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

Fonte: Do autor (2024)

Figura 8 - Produtividade acumulada de grãos dos três anos agrícolas nos quatro locais, em função das doses de calcário incorporadas 0-0,40 m. Significância do teste de F para o modelo: NS (não significativo)  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .



Fonte: Do autor (2024)

Para comparar as doses de calcário recomendadas pelos dois métodos de cálculos de necessidade calagem (NC) mais utilizados no Brasil com os resultados encontrados nos Locais 1, 2 e 4 foi elaborada a Tabela 6. Devido à interferência climática na produtividade acumulada no Local 3, os resultados não foram apresentados. Pelo Método de Saturação por Bases (RAIJ et al., 1997), também chamado de “Método de São Paulo” ou “Método de V%”, foi considerado a NC para elevação de V% a 70 e pelo método de neutralização de alumínio e incremento de cálcio e magnésio (Alvarez V.; Ribeiro, 1999), também chamado “Método de Minas”, o Y – capacidade tampão da acidez do solo, foi estimado para o Local 1 (Y = 0,95), Local 2 (Y = 2,73), e Local 4 (Y = 3,05). A máxima m% tolerada pelas culturas foi considerada como sendo 20 %, por ter sido a cultura da soja cultivada após a correção. O PRNT para fins de cálculo foi considerado como sendo o mesmo utilizado nos experimentos (Tabela 3) e a NC calculada pelos dois métodos foi multiplicada pelo fator 2, para uma profundidade efetiva de incorporação de 40 cm.

Tabela 6 - Doses de calcário ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) calculadas para elevação da saturação por bases a 70 % pelo Método de São Paulo<sup>1</sup> (RAIJ et al., 1997) e pelo método de neutralização de Al e incremento de Ca e Mg - Método de Minas Gerais<sup>2</sup> (ALVAREZ et al., 1999), e a dose para máxima produtividade acumulada obtida no presente estudo.

Local	Método de São Paulo <sup>3</sup>	Método de Minas Gerais <sup>3</sup>	Dose para máxima produtividade acumulada
Local 1	1,5	0,6	13,2
Local 2	5,9	0,0	17,1
Local 4	10,7	8,9	18,7

<sup>1</sup> $NC = \frac{T*(70 - V\% \text{ atual})}{PRNT}$ ; <sup>2</sup> $NC = Y * [Al^{3+} - (mt * \frac{t}{100})] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$  <sup>3</sup>Doses calculadas para a camada de 0 a 20 cm e multiplicado por 2 para atingir a camada de 0 a 40 cm.

Fonte: Do autor (2024).

## 4. DISCUSSÃO

### *4.1 Efeito das doses de calcário nos atributos químicos do solo*

Após cerca de três anos da instalação dos experimentos, houve efeito residual das doses de calcário expressa pela elevação dos valores de pH, na redução e manutenção dos baixos teores de H+Al, Al e baixos valores de m %, sobretudo, em doses elevadas (Figuras 3 e 4), além dos ganhos em produtividade com o aumento das doses de calcário (Figura 8). Na verdade, quando a calagem é feita em doses adequadas, com incorporação bem uniforme no perfil do solo, os efeitos residuais da calagem podem se estender por um longo período, podendo atingir sete anos (Ernani; Bayer; Maestri, 2000); 18 anos (Santos et al., 2018) ou mesmo ocorrer após 23 anos (Azevedo; Kämpf; Bohnen, 1996), sendo proporcional às doses utilizadas (Santos et al., 2018) e ao poder de tamponamento do solo (Holland et al., 2018).

O pH dos solos dos locais 1 e 3 foram mais facilmente elevados com as doses de calcário, atingindo valores superiores a 7,0. Isso reflete a menor capacidade tampão desses solos. Para o solo do Local 1, os baixos teores de MO e argila podem explicar o baixo tamponamento (Holland et al., 2018). Para o Local 3, esses fatores não são suficientes, pois o solo foi classificado como muito argiloso (argila > 60%) e apresentou teor médio de 3,6 % de MO na camada de 0-40 cm (Tabela 1), antes da aplicação do calcário. Nesse caso, o baixo poder tampão (H+Al) provavelmente estava associado à baixa atividade da fração argila ou, como será comentado no tópico seguinte, ao baixo tamponamento por outras fontes de acidez. Em solos com teor de argila  $\leq 40\%$ , valores de pH ligeiramente superiores a 7,0 também foram relatadas com a incorporação de doses de até 18 Mg ha<sup>-1</sup> (Fageria et al., 2013) e 24 Mg ha<sup>-1</sup> (Fageria; Stone, 2004).

Mesmo sob doses elevadas de calcário, os valores de pH dos solos dos locais 2 e 4 não atingiram a alcalinidade, com máximos valores estimados em 6,2 e 6,3 na camada de 0-20 cm, com doses de 20,0 e 24,3 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Resultados semelhantes foram observadas em outros estudos com solos semelhantes, onde foram utilizadas doses de calcários de 15 Mg ha<sup>-1</sup> (Moraes et al., 2023); 20 Mg ha<sup>-1</sup> (Fageria, 2011a) ou até 24 Mg ha<sup>-1</sup> (Fageria, 2006, 2008) ou em solos com elevado poder tampão no sul do Brasil, com doses de até 17 Mg ha<sup>-1</sup> (Rheinheimer et al. (2000) e 18 Mg ha<sup>-1</sup> (Ernani, Nascimento; Oliveira, 1998). Assim, com base nestes resultados, pode-se afirmar que a capacidade de tamponamento dos solos dos locais 2 e 4 foi maior do que dos solos dos locais 1 e 3.

As quantidades de  $Al_{KCl}$  foram diretamente associadas aos valores pH do solo (Figura 5), reduzindo a teores mínimos e constantes acima da faixa de pH 5,0-5,5. Godsey et al. (2007), estudando o efeito do diferentes rotações de culturas sobre o pH do solo e a influência nos teores de  $Al^{3+}$ , relataram resultados semelhantes, onde, em  $pH > 5,5$ , os teores de  $Al^{3+}$  foram muitos próximos do limite de detecção ( $0,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). À medida que aumenta os valores de pH, os cátions  $Al^{3+}$  são deslocados do complexo de trocas por cátions  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  fornecidos em grande quantidade pelo calcário, e a hidrólise do alumínio em solução reduz os teores de Al trocáveis com a precipitação na forma de  $Al(OH)_3$  (Tiecher et al., 2023). Dessa forma, há a redução dos teores de  $Al^{3+}$  e, por consequência, a m % também é reduzida com o aumento do pH do solo (Deus et al., 2020; Santos et al., 2018; Tiritan et al., 2016).

#### ***4.2 Alumínio extraído em $CuCl_2$ e o tamponamento do solo***

As quantidades de Al extraídos em  $CuCl_2$  foram muito superiores aos valores extraídas em KCl, independentemente do local, profundidade ou faixa de pH do solo (Figura 4). Essas observações reforçam uma ampla gama de trabalhos que também relataram resultados semelhantes (Aitken et al., 1992; Campos et al., 2014; Coelho et al., 2010, 2011; Garcia-rodeja et al., 2004; Hargrove; Thomas, 1981; Hargrove; Thomas, 1984; Juo; Kamprath, 1979; Oates; Kamprath, 1983a; Urrutia et al., 1995; Yvanes-giuliani et al., 2016). No entanto, as relações entre  $Al_{CuCl_2}$  e  $Al_{KCl}$  obtidas no presente estudo superam os relatos na literatura. No Local 1, os teores foram 6,7 (0-20 cm), 7,0 (20-40 cm) e 6,1 vezes (40-60 cm) superiores aos obtidos em  $Al_{KCl}$ . No Local 2, as quantidades de  $Al_{CuCl_2}$  foram 23,5 (0-20 cm) e 10,3 vezes (20-40 cm) superiores aos valores extraídos com KCl e mais de 40 vezes superiores aqueles extraídos com KCl de ambas as profundidades dos solos do Local 3. As maiores diferenças entre as quantidades extraídas por  $CuCl_2$  em KCl foram encontradas no Local 4, sendo de 146,8 (0-20 cm) e 38,8 vezes (20-40 cm). Rara exceção foi observada na profundidade de 40-60 cm, no Local 1, na qual algumas amostras apresentaram teor de  $Al_{KCl}$  maior que em  $CuCl_2$ .

Em outros trabalhos, as relações  $Al_{CuCl_2} / Al_{KCl}$  foram de 1,6 a 12 em solos ácidos da África, América do Sul e Carolina do Norte nos EUA (Juo; Kamprath, 1979), 1 a 55 sob combinações de culturas em rotação, em solo argiloso do Estado do Kansas nos EUA (Godsey et al., 2007), 10 a 70 em um Latossolo Vermelho, textura argilosa, sob doses de calcário e gesso e em sistema de plantio direto (SPD) no Paraná (Zambrosi; Alleoni; Caires., 2007) e de 0,8 a 23,6 vezes em amostras de 0-20 e 20-40 cm em 32 solos do Rio de Janeiro (Barra et al., 2001).

Geralmente, as maiores relações são encontradas em solos com elevado teor de C orgânico, onde a eficiência de extração pelo KCl diminui.

A elevada capacidade extratora das soluções de  $\text{CuCl}_2$  podem ser justificadas devido ao alto poder complexante dos íons  $\text{Cu}^{2+}$  (Juo; Kamprath, 1979). A afinidade de íons aos sítios funcionais da MO é determinada pela valência do cátion, mas o cobre é uma exceção à regra (Hargrove; Thomas, 1984) que, sendo um cátion divalente, ainda assim apresenta maior capacidade de complexação com ligantes orgânicos quando comparado a cátions trivalentes como  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{La}^{3+}$  (Aitken et al., 1992). Alguns autores também acreditam que a elevada acidez da solução extratora também contribui em aumentar a eficiência de extração do  $\text{CuCl}_2$  (Ponette; Andre; Dufey, 1996). No presente estudo, o pH médio da solução extratora foi de 2,8, semelhante ao observado por Garcia-Rodeja et al. (2004) e ligeiramente inferior ao pH 3,0, relatado por Oates e Kamprath (1983a). Em geral, o pH na solução de  $\text{CuCl}_2$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  na literatura oscila entre 2,7 a 3,3 (Matus et al., 2008; Campos et al., 2014). O  $\text{CuCl}_2$  é um ácido fraco e apresenta forte tamponamento de pH em torno de 3,0. Portanto, segundo Oates e Kamprath (1983a), o pH do solo tem pouco influência sobre o pH do extrato, enquanto que em soluções não tamponadas de KCl e  $\text{LaCl}_3$  a acidez da amostra define o pH da mistura. É também relatado que o baixo pH da solução de cobre pode superestimar os teores de Al associado à fração orgânica pela dissolução de formas inorgânicas de Al e hidróxi-Al precipitados pela calagem (Figueiredo; Almeida, 1991; Oates; Kamprath, 1983b; Urrutia et al., 1995). Uma forma de anular esse efeito seria a utilização de soluções de  $\text{CuCl}_2$  tamponadas em pH 5,4, equivalentes à solução KCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$ , como sugerem Motta e Melo (2009). No entanto, Aitken (1992) avaliou o efeito da extração de  $\text{CuCl}_2$  com pH sendo mantido nos mesmos valores de pH observados na solução extratora de KCl e os resultados mostraram que, ainda assim, a solução apresentou maior extração, justificado pelo maior poder de complexação com ligantes orgânicos pelo íon  $\text{Cu}^{2+}$  e pela maior força iônica da solução.

As diferenças encontradas nas relações entre  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2} / \text{Al}_{\text{KCl}}$  foram relativamente constantes no perfil de solo dos locais 1 e 3, que apresentaram baixos valores de  $\text{Al}^{3+}$ . Por outro lado, essas relações foram muito maiores nas camadas superficiais dos solos dos locais 2 e 4 do que nas camadas de 20 a 40 cm, que apresentavam maiores teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$ . Isso ocorreu por dois motivos: a) nos tratamentos sem calcário, a camada de 0-20 cm apresentou os maiores teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  no perfil de solo, para todos os locais; b) nos tratamentos com calcário, nos Locais 2 e 4, os teores de  $\text{Al}_{\text{KCl}}$  foram reduzidos em ambas as profundidades, mas foram observados maiores teores na camada de 20-40 cm e, como não foram observados efeitos sobre  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  nessa profundidade, os valores foram mais próximos, explicando a menor relação entre

as quantidades de Al por esses extratores. O  $\text{CuCl}_2$  apresenta a capacidade de extrair formas estáveis de Al-MO (Juo; Kamprath, 1979), e considerando que os teores de MO diminuem em camadas mais profundas (Caires; Barth; Garbui, 2006), eram esperados menores teores nas camadas de 20 a 40 cm. A maior capacidade de extração de Al organicamente ligado também foi demonstrada por Yvanes-Giuliani, Waite e Collins (2014), que relataram uma correlação positiva ( $r = 0,81$ ) com a MO. Uma correlação ainda maior ( $r = 0,91$ ) foi obtida por Coelho et al. (2010) em 31 perfis de Espodossolos e Neossolos Quartzarênico no estado de São Paulo. Da mesma forma, no presente estudo, houve relação direta entre as quantidades de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2 - \text{KCl}}$  e o conteúdo de MO na profundidade de 0-20 cm nos tratamentos sem a aplicação do calcário, o que reforça a associação dessa forma de Al não trocável aos complexos orgânicos.

As quantidades de Al extraídas em  $\text{CuCl}_2$  foram reduzidas com a calagem e não podem ser explicadas apenas pela redução da fração trocável de  $\text{Al}_{\text{KCl}}$ . A redução de Al não trocável também foi observada por Zambrosi, Alleoni e Caires (2007) cinco anos após a aplicação do calcário num solo sob SPD e foi inversamente relacionada com o pH do solo. Quando a calagem foi feita incorporada a 20 cm, a redução no conteúdo de Al-MO foi observada até 20-40 cm. Da mesma forma, uma redução de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  de 12,7 para 7,0  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  foi observada com aplicação de doses entre 0,0 e 18,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de calcário incorporado a 17 cm em um Latossolo no Sul do Brasil (Ernani; Nascimento; Oliveira, 1998).

Os resultados do presente estudo não permitem conclusões amplas acerca do efeito tampão de formas não trocáveis de Al no solo, mas traz evidências que enriquecem a discussão e podem direcionar novas investigações. A constatação de redução dos teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  com o aumento das doses de calcário aplicadas, em todos os locais e em boa parte das profundidades analisadas, apontam que outras formas de alumínio no solo reagem simultaneamente com o calcário adicionado, além das formas trocáveis frequentemente estudadas e utilizadas em alguns métodos de recomendação de calagem. As reações de grandes quantidades de Al associado à MO com o calcário ocorrem lentamente, levando maior tempo para se estabilizar (Hargrove; Thomas, 1984; Juo; Kamprath, 1979; Oates; Kamprath, 1983b; Takahashi et al., 2005). Já foi demonstrado que maiores quantidades de calcário seriam recomendadas se os teores de  $\text{Al}_{\text{CuCl}_2}$  fossem utilizados como critério (Aitken, 1992; Oates; Kamprath, 1983b). Assim, a neutralização da quantidade adicional de alumínio pode explicar, em partes, o fato de o pH dos solos não atingir a condição de alcalinidade, mesmo quando doses elevadas de calcário foram aplicadas. No presente estudo, condições de pH acima da faixa de neutralidade foram encontrados nos locais 1 e 3 (Figura 3), que apresentaram os menores teores de Al extraído em  $\text{CuCl}_2$  (Figura 4). Desta forma, os solos dos locais 2 e 4 com maiores teores de Al extraído em

CuCl<sub>2</sub> (Figura 4) apresentaram maior poder tampão, portanto, menores valores de pH mesmo com altas doses de calcário aplicadas (Figura 3). Possivelmente o fato de Al<sub>CuCl2</sub> não ser considerado nas recomendações de calcário faz que haja uma subestimativa da necessidade de calagem e uma diferença tão grande entre as doses recomendadas e as necessárias para se atingir as produtividades máximas (Tabela 4), como também discutido na literatura (Fageria, 2001; Guarçoni; Sobreira, 2017; Moraes et al., 2023; Moreira et al., 2024; Teixeira et al., 2020a, 2020b).

Outra evidência que reforça o poder tampão do Al<sub>CuCl2</sub> é a associação linear entre as quantidades de Al extraídas em CuCl<sub>2</sub> e a acidez potencial (Figura 6). Essas relações foram sempre maiores nas camadas superiores, independentemente do local e, provavelmente, estão associadas ao maior conteúdo de MO em superfície. O coeficiente de determinação nos locais 3 e 4 foram mais baixos que aqueles observados nos locais 1 e 2, indicando que outras fontes de acidez, como a desprotonação de grupos OH das superfícies minerais e orgânicas, contribuem de forma expressiva nesses solos. Uma relação linear entre Al<sub>CuCl2</sub> e os teores de H+Al determinados em acetado de Ca 0,5 mol L<sup>-1</sup> (pH 7,0) também foi relatada por Figueiredo e Almeida (1991). Esses autores também discutem que, pela proximidade entre os teores de Al<sub>CuCl2</sub> e H+Al, o acetato de Ca provavelmente não extrai Al ligado à MO e, conseqüentemente, poderia subestimar o real poder tampão dos solos. Os valores de H+Al obtidos no presente estudo foram determinados pelo método tampão SMP, assim, não se tem subsídios suficientes para discutir uma possível subestimação da acidez potencial. No entanto, a constatação de teores de H+Al mesmo em pH superior a 7,0 pode indicar que, de alguma forma, para este estudo, a associação entre o H+Al (SMP) e valores correspondentes à curva de H+Al em acetato de Ca não está bem calibrada.

### ***4.3 Efeitos da correção do solo sobre o rendimento das culturas***

As melhorias nos atributos químicos no perfil de solo provocadas pelo aumento das doses de calcário (Tabela 5) refletiram positivamente no aumento da produtividade acumulada de grãos em três dos quatro locais estudados (Figura 8). Além da elevação dos teores de Ca e Mg para níveis adequados pela calagem, o incremento no pH e a redução de Al proporcionam um ambiente quimicamente favorável para o desenvolvimento radicular, aumentando o volume de solo explorado e o acesso a água e nutrientes (Bortoluzzi et al., 2014; Leite et al., 2006; Moraes et al., 2023). Como consequência, o aumento na produtividade de grãos é

frequentemente associado ao uso do calcário (Caires et al., 2015; Fageria, 2001, 2008; Quaggio et al., 1993; Raij et al., 1983).

A acidez no subsolo é sabidamente um dos principais limitantes ao desenvolvimento adequado das culturas em solos tropicais (Raij, 2011) e a incorporação profunda do calcário, como apresentado no presente estudo, é uma estratégia eficiente para a correção química do perfil, impactando significativamente a produtividade (Gonzalez-erico, 1979; Moraes, et al., 2023). Apesar disso, a recomendação de calagem incorporada visando a correção da camada de 0-20 cm, outrora denominada “camada arável”, prevalece há muito tempo no Brasil, seja por limitações financeiras e operacionais, rusticidade e baixo potencial produtivo das cultivares, sistemas de produção pouco intensificados ou por uma combinação desses fatores (Alvarez V.; Ribeiro, 1999; Raij et al., 1997; Souza; Lobato, 2004). Embora os métodos oficiais tenham sido muito importantes para o desenvolvimento da agricultura brasileira, sobretudo, em áreas de baixa fertilidade como no bioma Cerrado (Lopes; Guilherme, 2016), essas recomendações precisam ser revistas. Com a correção apenas da camada de 0-20 cm, a distribuição das raízes fica limitada aos primeiros centímetros de solo e as plantas se tornam mais suscetíveis aos períodos de restrição hídrica, uma vez que a camada superficial é a primeira a secar na ausência de chuvas (Joris et al., 2013). Outra consequência é que, ao considerar uma estreita camada de solo a ser corrigido, as doses recomendadas geralmente são baixas e frequentemente subestimam as reais necessidades de calcário para o solo e a demanda das culturas, com pouca ou nenhuma ação do corretivo em camadas subsuperficiais (Gonzalez-erico et al., 1979).

As doses calculadas pelos métodos oficiais subestimaram a necessidade real de calagem para máxima produtividade acumulada em três dos quatro locais estudados, sendo as menores estimativas obtidas pelo Método de Minas (Tabela 6). Esse resultado já era esperado, uma vez que os parâmetros dessa fórmula (vide rodapé da Tabela 6) levam ao cálculo de menor NC, por considerar uma m% tolerada (mt) de cerca de 20% por grande parte das culturas e pelo fato de que a fórmula de cálculo considera uma exigência em de Ca + Mg pelas culturas (X) de apenas  $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , que é insuficiente para atender as necessidades das culturas (Moraes et al., 2023; Moreira; Moraes, 2018). Especialmente no Local 2, a calagem não seria recomendada pelo Método de Minas, porque a m % do solo antes da instalação do experimento era inferior ao valor de mt (20%), preconizado na metodologia e o somatório de Ca e Mg (2,1) foi superior ao valor de referência para a cereais e leguminosas ( $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (Alvarez V.; Ribeiro, 1999). No entanto, as produtividades foram aumentadas com a calagem (Figura 8) e foi estimada que para a máxima produtividade acumulada era necessária a dose de  $17,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Com esta dose

houve um incremento de 31,5% em relação ao tratamento sem calcário, um acréscimo de 5125 kg ha<sup>-1</sup> ao longo de seis cultivos.

Quanto ao Método de São Paulo, as doses calculadas subestimaram as necessidades de calagem principalmente nos locais 1 e 2. No Local 4, embora a máxima produtividade acumulada tenha sido estimada em dose superior à calculada por esse método, nota-se na Figura 8d que a produtividade tendeu a se estabilizar a partir da dose de 12 Mg ha<sup>-1</sup>, dose muito próxima daquela calculada (10,7 Mg ha<sup>-1</sup>). Porém, é válido ressaltar que a máxima produtividade acumulada, estimada na dose de 18,1 Mg ha<sup>-1</sup> a partir da equação polinomial ajustada aos dados (Figura 8d), foi de 7489,1 kg ha<sup>-1</sup> em dois cultivos de soja, o que dá uma produtividade média de 3744,5 kg ha<sup>-1</sup>, ou seja, considerada baixa para a cultura (Moreira et al., 2023). Dessa forma, é possível que as baixas produtividades tenham limitado o potencial de resposta da cultura às doses de calcário aplicadas. As doses apresentadas na Tabela 6 foram calculadas para elevar a V% a 70 no perfil de 0-40 cm, no entanto, os valores observados foram inferiores ao estimado (dados não apresentados), assim como foi relatado em outros trabalhos (Alleoni et al., 2005; Barbosa Filho; Fageria; Zimmermann, 2005; Raij et al., 1998; Teixeira et al., 2020a), reforçando que as doses calculadas por esse método também subestimam as necessidades de calcário. As diferenças entre V% estimada e V% observada podem ter ocorrido por uma reação mais lenta do calcário do que a esperada (Souza; Lobato, 2004) ou, ainda, por uma subestimativa da acidez potencial desses solos (Teixeira et al., 2020b).

Aumentos de produtividade com doses de calcário superiores às calculadas foram descritos em vários trabalhos (Barbosa Filho; Silva, 2000; Ernani; Nascimento; Oliveira, 1998; Fageria; Santos; Moreira, 2010; Fageria; Stone; Moreira, 2008; Moraes et al., 2023; Moreira et al., 2024; Raij et al., 1998; Raij, 2011). Esses resultados apontam que a necessidade de calagem para atender às demandas das culturas têm sido superiores às calculadas, devido a vários fatores, como a maior exigência das cultivares modernas que apresentam alto potencial de produtividade e maior sensibilidade à acidez; sistemas mais intensificados, com duas ou mais culturas em um mesmo ano agrícola e com elevado consumo de fertilizantes com potencial acidificante; riscos climáticos associados aos cultivos de inverno e pela necessidade de construção da fertilidade do solo em maiores profundidades (Moraes et al., 2023; Moreira et al., 2023). Além disso, as doses calculadas pelos métodos oficiais frequentemente diferem daquelas necessárias para atingir níveis pré-determinados de atributos químicos no solo, como pH, mesmo sob condições controladas (Teixeira et al., 2020b).

Dessa forma, há a necessidade de mais pesquisas sobre esse assunto, visando cada vez mais o aperfeiçoamento das recomendações. Os resultados discutidos nesse trabalho mostraram

que as culturas responderam positivamente ao uso de doses superiores e os resultados de solos indicaram que outras formas de alumínio também reagiram com o calcário e podem estar associadas ao tamponamento de pH. Assim, novos trabalhos deverão ser desenvolvidos para definir a magnitude do efeito dos reservatórios de Al potencialmente reativos sobre a capacidade tampão de pH e como devem ser abordados no contexto das recomendações de calagem.

## 5. CONCLUSÃO

A calagem elevou o valor de pH dos solos em todos os locais e em todas as profundidades amostradas e geralmente reduziu os teores de Al trocável (extraídos em KCl), formas não trocáveis (extraído em  $\text{CuCl}_2$ ), Al ligado à matéria orgânica (extraído em  $\text{CuCl}_2 - \text{KCl}$ ) e a acidez potencial dos solos.

Os teores de Al ligados à MO foram muito superiores aos extraídos em KCl, variando de 7 a 93 vezes maiores nos diferentes locais.

A elevação do pH e a redução de  $\text{H}^+\text{Al}$ , Al e m % foram significativamente correlacionados com a produtividade das diferentes culturas ao longo do período avaliado.

A doses de calcário incorporadas em profundidade geralmente aumentaram as produtividades acumulada de grãos.

As produtividades máximas de grãos foram obtidas com doses muito acima daquelas calculadas pelo método da elevação da saturação por bases a 70% e pelo método da neutralização do alumínio e aumento dos teores de Ca e Mg.

## REFERÊNCIAS

- AITKEN, R. L. Relationships between extractable Al, selected soil properties, pH buffer capacity and lime requirement in some acidic Queensland soils. **Soil research**, v. 30, n. 2, p. 119, 1992.
- ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 74, n. 3, p. 1010–1017, 2010.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 29, n. 6, p. 923–934, 2005.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes Em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, cap. 8, p. 43–60.
- AULER, A. C. et al. Lime effects in a no-tillage system on Inceptisols in Southern Brazil. **Geoderma regional**, v. 16, n. e00206, p. e00206, 2019.
- AZEVEDO, A. C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 20, n. 2, p. 191–198, 1996.
- BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e incorporada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 3, p. 507–514, 2005.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1317–1324, 2000.
- BARRA, C. M. et al. Evaluation of four aluminum extraction methods using selected Brazilian soils. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 32, n. 11–12, p. 1969–1980, 2001.
- BLOOM, P. R.; MCBRIDE, M. B.; WEAVER, R. M. Aluminum organic matter in acid soils: Buffering and solution aluminum activity. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 3, p. 488–493, 1979.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil & tillage research**, v. 89, n. 1, p. 3–12, 2006.

CAMPOS, J. R. DA R. et al. Extração e quantificação de alumínio trocável em Organossolos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 49, n. 3, p. 207–214, 2014.

COELHO, M. R. et al. Avaliação de cloretos não tamponados como extratores de alumínio associado à matéria orgânica em solos da planície costeira do estado de São Paulo. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 35, n. 5, p. 1619–1632, 2011.

COELHO, M. R. et al. Seletividade do pirofosfato de sódio e de cloretos não tamponados (CuCl<sub>2</sub> e LaCl<sub>3</sub>) como extratores de alumínio associado à matéria orgânica em solos de restinga do estado de São Paulo. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 34, n. 5, p. 1561–1572, 2010.

COSTA, C. H. M. da et al. Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management. **Crop & pasture science**, v. 69, n. 5, p. 488, 2018.

DEUS, A. C. F. et al. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil & tillage research**, v. 196, n. 104422, p. 104422, 2020.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; OLIVEIRA, L. C. Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 22, n. 2, p. 275–280, 1998.

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

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.

FAGERIA, N. K. et al. Optimal acidity indices for soybean production in Brazilian oxisols. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 44, n. 20, p. 2941–2951, 2013.

FAGERIA, N. K. Liming and copper fertilization in dry bean production on an oxisol in no-tillage system. **Journal of plant nutrition**, v. 29, n. 7, p. 1219–1228, 2006.

FAGERIA, N. K. Optimum soil acidity indices for dry bean production on an oxisol in no-tillage system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 39, n. 5–6, p. 845–857, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. Differential soil acidity tolerance of tropical legume cover crops. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 40, n. 7–8, p. 1148–1160, 2009.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; MOREIRA, A. Yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties as influenced by liming and iron application in common bean in a no-

tillage system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 41, n. 14, p. 1740–1749, 2010.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. Liming and manganese influence on common bean yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties of an oxisol under no-tillage system. **Journal of plant nutrition**, v. 31, n. 10, p. 1723–1735, 2008.

FIGUEIREDO, O. A. R.; ALMEIDA, J. A. Quantificação de formas trocáveis e não trocáveis de alumínio em solos ácidos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p. 151-156, 1991.

GARCÍA-RODEJA, E. et al. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. **Catena**, v. 56, n. 1–3, p. 155–183, 2004.

GODSEY, C. B. et al. Changes in soil pH, organic carbon, and extractable aluminum from crop rotation and tillage. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 71, n. 3, p. 1038–1044, 2007.

GONZALEZ-ERICO, E. et al. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of central Brazil. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 6, p. 1155–1158, 1979.

GUARÇONI, A.; SOBREIRA, F. M. Classical methods and calculation algorithms for determining lime requirements. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 41, n. 0, 2017.

HARGROVE, W. L.; THOMAS, G. W. Extraction of aluminum from aluminum-organic matter Complexes1. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 45, n. 1, p. 151, 1981.

HARGROVE, W. L.; THOMAS, G. W. Extraction of aluminum from aluminum-organic matter in relation to titratable acidity. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 48, n. 6, p. 1458–1460, 1984.

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

JACKSON, M. L. Aluminum bonding in soils: A unifying principle in soil science. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 27, n. 1, p. 1–10, 1963.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424, 2013.

JUO, A. S. R.; KAMPRATH, E. J. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 1, p. 35–38, 1979.

KAMINSKI, J. et al. Resposta de culturas à aplicação de calcário em superfície ou incorporado ao solo em campo nativo. **Ciencia rural**, v. 30, n. 4, p. 605–609, 2000.

KAMPRATH, E. J. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 34, n. 2, p. 252–254, 1970.

LEITE, G. H. M. N. et al. Atributos químicos e perfil de enraizamento de milho influenciados pela calagem em semeadura direta. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 30, n. 4, p. 685–693, 2006.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 1–72.

MATUS, F. et al. Relationship between extractable Al and organic C in volcanic soils of Chile. **Geoderma**, v. 148, n. 2, p. 180–188, 2008.

MORAES, F. A. de et al. Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 144, n. 126763, p. 126763, 2023.

MOREIRA, S. G. et al. Circular agriculture increases food production and can reduce N fertilizer use of commercial farms for tropical environments. **The Science of the total environment**, v. 879, n. 163031, p. 163031, 2023.

MOREIRA, S. G. et al. Deep incorporation of high limestones rates affects the macro and micronutrients availability and the accumulated grain yield in three acidic sites in Brazil. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 154, n. 127074, p. 127074, 2024.

MOREIRA, S. G. MORAES, F. A. de. Construção da Fertilidade do solo para Sistema de Produção de Culturas Anuais. In: PAES, M. C. D.; PINHO, R. G. V.; MOREIRA, S. G. (Ed.). **Livro de Palestras: Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil**. Sete Lagoas: ABMS, 2018, cap. 13, p. 347-383.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. de F. Química de solos ácidos. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo: parte II – aplicações**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, cap. 18, p. 313-380.

OATES, K. M.; KAMPRATH, E. J. Soil acidity and liming: I. effect of the extracting solution cation and pH on the removal of aluminum from acid soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 47, n. 4, p. 686–689, 1983a.

OATES, K. M.; KAMPRATH, E. J. Soil acidity and liming: II. Evaluation of using aluminum extracted by various chloride salts for determining lime requirements. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 47, n. 4, p. 690–692, 1983b.

ÖHMAN, L. O. Equilibrium and structural studies of silicon (IV) and aluminum (III) in aqueous solution. 17. Stable and metastable complexes in the system  $H^+ - Al^{3+}$ -citric acid. **Inorganic chemistry**, v. 27, n. 15, p. 2565–2570, 1988.

- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 46, n. 6, p. 1201–1207, 1982.
- PONETTE, Q.; ANDRE, D.; DUFEY, J. E. Chemical significance of aluminium extracted from three horizons of an acid forest soil, using chloride salt solutions. **European journal of soil science**, v. 47, n. 1, p. 89–95, 1996.
- QUAGGIO, J. A. et al. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 3, p. 375-383, 1993.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2022. Obtido de: <https://www.R-project.org>.
- RAIJ, B. V. et al. Alumínio trocável e saturação em bases como critérios para recomendação de calagem. **Bragantia**, v. 42, n. 1, p. 149–156, 1983.
- RAIJ, B. V. et al. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 22, n. 1, p. 101–108, 1998.
- RAIJ, B. V. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações agronômicas**. n. 135, International Plant Nutrition Institute, 2011, p. 8-18.
- RAIJ, B. V.; et al. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC & Fundação IAC (Boletim Técnico), 1997. 285 p.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 24, n. 4, p. 797–805, 2000.
- SANTOS, D. R. dos et al. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil & tillage research**, v. 180, p. 222–231, 2018.
- SANTOS, H. G. dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Embrapa Solos. Brasília, DF, 2018.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**, 12th Edn Washington. DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, 2014.
- SOUZA, D. M. de; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUZA, D. M. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, cap. 3, p. 81-96.
- TAKAHASHI, T. et al. Effect of liming on organically complexed aluminum of nonallophanic Andosols from northeastern Japan. **Geoderma**, v. 130, n. 1–2, p. 26–34, 2006.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revisada e ampliada, Brasília: Embrapa, 2017, 574 p.

TEIXEIRA, W. G. et al. Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 44, 2020b.

TEIXEIRA, W. G.; ALVAREZ V., V. H.; NEVES, J. C. L. New methods for estimating lime requirement to attain desirable pH values in Brazilian soils. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 44, 2020a.

THE JAMOVİ PROJECT. *jamovi*. (Version 2.3) [Computer Software], 2022. Obtido de: <https://www.jamovi.org>.

TIECHER, T. et al. Base saturation is an inadequate term for Soil Science. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 46, 2022.

TIRITAN, C. S. et al. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil & tillage research**, v. 155, p. 437–447, 2016.

URRUTIA, M.; MACÍAS, F.; GARCÍA-RODEJA, E. Evaluación del  $\text{CuCl}_2$  y del  $\text{LaCl}_3$  como extractantes de aluminio en suelos ácidos de Galicia. **Nova acta científica compostelana. Biología: NACC. Biología**, v. 5, 1995.

VIEIRA, F. C. B. et al. Organic amendment effects on the transformation and fractionation of aluminum in acidic sandy soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 39, n. 17–18, p. 2678–2694, 2008.

YVANES-GIULIANI, Y. A. M. et al. Isotopically exchangeable Al in coastal lowland acid sulfate soils. **The Science of the total environment**, v. 542, p. 129–135, 2016.

YVANES-GIULIANI, Y. A. M.; WAITE, T. D.; COLLINS, R. N. Exchangeable and secondary mineral reactive pools of aluminium in coastal lowland acid sulfate soils. **The Science of the total environment**, v. 485–486, p. 232–240, 2014.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Teores de alumínio trocável e não trocável após calagem e gessagem em Latossolo sob plantio direto. **Bragantia: boletim tecnico do Instituto Agronomico do Estado de Sao Paulo**, v. 66, n. 3, p. 487–495, 2007.

APÊNDICE A – Modelo estatístico das variáveis avaliadas no presente estudo, conforme a indicação do atributo.

(Continua)

Atributo	Localidade	Figura	Profundidade (cm)	Equação	R <sup>2</sup>	Significância	
pH (H <sub>2</sub> O)	Local 1	Figura 3a	0-20	$\hat{y} = -0,0109x^2 + 0,3307x + 5,1768$	0,9746	***	
			20-40	$\hat{y} = -0,0052x^2 + 0,1972x + 5,1348$	0,9758	*	
			40-60	$\hat{y} = 0,0380x + 5,6571$	0,7437	**	
	Local 2	Figura 3b	0-20	$\hat{y} = 0,0698x + 4,8476$	0,8926	***	
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 5,175$	-	-	
	Local 3	Figura 3c	0-20	$\hat{y} = -0,0089x^2 + 0,2698x + 5,2390$	0,9638	***	
			20-40	$\hat{y} = -0,0037x^2 + 0,1224x + 5,2205$	0,9812	*	
	Local 4	Figura 3d	0-20	$\hat{y} = -0,0026x^2 + 0,1261x + 4,7510$	0,8972	*	
			20-40	$\hat{y} = -0,0013x^2 + 0,0634x + 4,5302$	0,8922	*	
	H + Al	Local 1	Figura 3e	0-20	$\hat{y} = 0,0051x^2 - 0,1458x + 1,7134$	0,9480	***
				20-40	$\hat{y} = -0,0361x + 1,5274$	0,9292	***
				40-60	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 1,146$	-	-
Local 2		Figura 3f	0-20	$\hat{y} = 0,0119x^2 - 0,4290x + 6,0429$	0,9950	**	
			20-40	$\hat{y} = -0,0986x + 5,2774$	0,7741	**	
Local 3		Figura 3g	0-20	$\hat{y} = 0,0110x^2 - 0,3272x + 3,8893$	0,7409	*	
			20-40	$\hat{y} = -0,0552x + 3,4976$	0,5611	**	
Local 4		Figura 3h	0-20	$\hat{y} = 0,0100x^2 - 0,4259x + 6,8531$	0,8990	***	
			20-40	$\hat{y} = 0,0051x^2 - 0,2465x + 6,8573$	0,9132	**	

APÊNDICE A – Modelo estatístico das variáveis avaliadas no presente estudo, conforme a indicação do atributo.

(Continuação)

Atributo	Localidade	Figura	Profundidade (cm)	Equação	R <sup>2</sup>	Significância
Al <sub>KCl</sub>	Local 1	Figura 4a	0-20	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,15$	-	-
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,16$	-	-
			40-60	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,14$	-	-
	Local 2	Figura 4b	0-20	$\hat{y} = 0,0054x^2 - 0,1607x + 1,2964$	0,9934	***
			20-40	$\hat{y} = -0,0398x + 1,0774$	0,6987	**
	Local 3	Figura 4c	0-20	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,09$	-	-
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,10$	-	-
	Local 4	Figura 4d	0-20	$\hat{y} = 0,0028x^2 - 0,1094x + 0,9719$	0,8976	***
			20-40	$\hat{y} = 0,0015x^2 - 0,0662x + 0,8125$	0,9315	***
Saturação por Al	Local 1	Figura 4e	0-20	$\hat{y} = 0,0526x^2 - 1,4076x + 12,4250$	0,7763	***
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 7,55$	-	-
			40-60	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 8,51$	-	-
	Local 2	Figura 4f	0-20	$\hat{y} = 0,1653x^2 - 4,8938x + 36,3880$	0,9821	***
			20-40	$\hat{y} = 0,1261x^2 - 4,1296x + 43,7337$	0,8822	*
	Local 3	Figura 4g	0-20	$\hat{y} = 0,0316x^2 - 0,7812x + 5,2639$	0,8542	***
			20-40	$\hat{y} = 0,0336x^2 - 0,9606x + 8,8413$	0,9201	***
	Local 4	Figura 4h	0-20	$\hat{y} = 0,1910x^2 - 7,2429x + 61,1041$	0,8865	***
			20-40	$\hat{y} = 0,1409x^2 - 5,8764x + 61,9627$	0,9202	***

## APÊNDICE A – Modelo estatístico das variáveis avaliadas no presente estudo, conforme a indicação do atributo.

(Continuação)

Atributo	Localidade	Figura	Profundidade (cm)	Equação	R <sup>2</sup>	Significância
Al <sub>CuCl2</sub>	Local 1	Figura 4i	0-20	$\hat{y} = 0,0034x^2 - 0,1010x + 1,5216$	0,9325	***
			20-40	$\hat{y} = 0,0016x^2 - 0,0537x + 1,3083$	0,9610	*
			40-60	$\hat{y} = -0,0443x + 1,1340$	0,3784	**
	Local 2	Figura 4j	0-20	$\hat{y} = -0,1345 + 7,0662$	0,8891	***
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 6,00$	-	-
	Local 3	Figura 4k	0-20	$\hat{y} = 0,0086x^2 - 0,2692x + 4,6500$	0,9327	**
			20-40	$\hat{y} = -0,0487x + 4,5538$	0,8991	***
	Local 4	Figura 4l	0-20	$\hat{y} = 0,0073x^2 - 0,3549x + 10,4761$	0,9016	*
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 7,87$	-	-
Al <sub>CuCl2</sub> - Al <sub>KCl</sub>	Local 1	Figura 4m	0-20	$\hat{y} = 0,0033x^2 - 0,0973x + 1,3591$	0,9487	***
			20-40	$\hat{y} = -0,0203x + 1,0502$	0,7220	**
			40-60	$\hat{y} = -0,0462x + 1,0161$	0,3673	**
	Local 2	Figura 4n	0-20	$\hat{y} = -0,0810x + 6,0555$	0,7877	***
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 5,32$	-	-
	Local 3	Figura 4o	0-20	$\hat{y} = 0,0077x^2 - 0,2504x + 4,4961$	0,9384	*
			20-40	$\hat{y} = -0,0466x + 4,4316$	0,8979	***
	Local 4	Figura 4p	0-20	$\hat{y} = -0,1209x + 9,0330$	0,7804	***
			20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 7,55$	-	-

APÊNDICE A – Modelo estatístico das variáveis avaliadas no presente estudo, conforme a indicação do atributo.

(Continuação)

Atributo	Localidade	Figura	Profundidade (cm)	Equação	R <sup>2</sup>	Significância
Al <sub>KCl</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 1	Figura 5a	0-20	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,1500$	-	-
		Figura 5e	20-40	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,1625$	-	-
		Figura 5i	40-60	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} = 0,1375$	-	-
Al <sub>CuCl2</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 1	Figura 5a	0-20	$\hat{y} = 0,0829x^2 - 0,3485x + 6,2992$	0,9156	***
		Figura 5e	20-40	$\hat{y} = 0,0599x^2 - 0,9688x + 4,7078$	0,8806	***
		Figura 5i	40-60	$\hat{y} = -0,07242x + 5,0639$	0,2418	*
Al <sub>KCl</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 2	Figura 5b	0-20	$\hat{y} = 0,9692x^2 - 11,5950x + 34,6533$	0,8847	***
		Figura 5f	20-40	$\hat{y} = 1,3536x^2 - 15,5549x + 44,7472$	0,8409	***
Al <sub>CuCl2</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 2	Figura 5b	0-20	$\hat{y} = -1,9458x + 16,5119$	0,8574	***
		Figura 5f	20-40	$\hat{y} = -1,9484x + 16,0850$	0,7341	***
Al <sub>KCl</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 3	Figura 5c	0-20	$\hat{y} = -0,0407x + 0,3601$	0,2999	**
		Figura 5g	20-40	$\hat{y} = -0,0316x + 0,2884$	0,2157	*
Al <sub>CuCl2</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 3	Figura 5c	0-20	$\hat{y} = -0,9370x + 9,4348$	0,7223	***
		Figura 5g	20-40	$\hat{y} = -0,9509x + 9,6850$	0,5855	***
Al <sub>KCl</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 4	Figura 5d	0-20	$\hat{y} = 0,3423x^2 - 4,3102x + 13,5482$	0,7917	***
		Figura 5h	20-40	$\hat{y} = 0,7792x^2 - 8,5618x + 23,5887$	0,8703	***
Al <sub>CuCl2</sub> ~ pH <sub>2</sub> O	Local 4	Figura 5d	0-20	$\hat{y} = 1,3736x^2 - 17,2737x + 60,8656$	0,5297	***
		Figura 5h	20-40	$\hat{y} = -1,5549x + 15,7479$	0,2564	**

APÊNDICE A – Modelo estatístico das variáveis avaliadas no presente estudo, conforme a indicação do atributo.

						(Conclusão)
Atributo	Localidade	Figura	Profundidade (cm)	Equação	R <sup>2</sup>	Significância
(H+Al) ~ Al <sub>CuCl2</sub>	Local 1	Figura 6a	0-20	$\hat{y} = 1,2695x - 0,2921$	0,8700	***
		Figura 6e	20-40	$\hat{y} = 1,3162x - 0,1620$	0,7178	***
		Figura 6i	40-60	$\hat{y} = 0,1146x + 1,0666$	0,2268	*
	Local 2	Figura 6b	0-20	$\hat{y} = 1,1088x - 2,8391$	0,8004	***
		Figura 6f	20-40	$\hat{y} = 1,0614x - 2,0789$	0,6845	***
	Local 3	Figura 6c	0-20	$\hat{y} = 0,9774x - 0,9080$	0,5039	***
		Figura 6g	20-40	$\hat{y} = 0,5681x + 0,6355$	0,1888	*
	Local 4	Figura 6d	0-20	$\hat{y} = 0,7097x - 1,6827$	0,5442	***
		Figura 6h	20-40	$\hat{y} = 0,7097x - 0,7393$	0,3642	***

Significância do teste de F para o modelo: *NS* (não significativo)  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

Fonte: Do autor (2024)

## **ARTIGO 2 - EFEITOS DA CALAGEM SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO**

### **RESUMO**

O manejo da acidez do solo é necessário para se atingir altas produtividades. A elevação do pH do solo a patamares adequados, juntamente com a neutralização de alumínio, e aumentos de cálcio e magnésio proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento radicular, permitindo que as plantas produzam mesmo sob condições de instabilidade climática. Objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito de doses crescentes de calcário incorporado sobre os atributos químicos do solo, disponibilidade de nutrientes e a produtividade das culturas soja e milho. O experimento foi instalado em 2018, sob um Latossolo Vermelho Argiloso, na cidade de São João Del Rei, em Minas Gerais. Adotou-se um delineamento em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram doses de calcário de 0,0; 4,0; 8,0; 12,0; 16,0 e 20,0 Mg ha<sup>-1</sup>, incorporadas a 40 cm de profundidade. Foram monitorados os atributos químicos do solo, a concentração foliar de nutrientes e a produtividade das culturas de soja e milho ao longo de quatro anos de estudo. Foi feita a análise de variância (anova) dos dados e, quando pertinentes, foram realizadas as análises de regressão, usando o software R. A calagem aumentou os valores de pH e V% e teores de Ca e Mg em 0-20 e 20-40 cm, com maiores incrementos na camada superficial. No entanto, os teores de micronutrientes no solo não foram modificados pela calagem, com exceção dos teores de Fe no primeiro e segundo ano, e o B no segundo ano, que foram reduzidos com o aumento das doses de calcário. Nas folhas, as concentrações de B, Fe e Mn na soja (2020/21) e Fe no milho (2021/22) foram reduzidas com as doses de calcário, mas se mantiveram acima ou dentro da faixa de valores considerados adequados, de acordo com padrões da literatura. No caso dos macronutrientes, as concentrações de Ca nas folhas de soja e de Mg nas folhas de soja e milho foram incrementadas com as doses de calcário. A produtividade das culturas foi afetada pelos tratamentos e pelas condições climáticas. Sob restrição hídrica, somente a soja apresentou incremento de produtividade com o aumento das doses. O milho não apresentou resposta à calagem em nenhuma das safras. Ao longo de quatro anos de estudo, a calagem apresentou efeito residual sobre os atributos químicos do solo e a resposta das culturas esteve associada ao regime de chuvas durante o ciclo.

**Palavras-chave:** Calcário incorporado. Acidez do solo. Produção de grãos. Micronutrientes.

### ABSTRACT

Managing soil acidity is necessary to achieve high productivity. Raising soil pH to adequate levels, together with the neutralization of aluminum, and increases in calcium and magnesium, provide improved conditions for root development, allowing plants to produce the same conditions of climatic instability. The objective of this work was to evaluate the effect of increasing doses of incorporated limestone on soil chemical attributes, nutrient availability and productivity of soybean and corn crops. The experiment was installed in 2018, under a Red Clay Oxisol, in the city of São João Del Rei, in Minas Gerais. A randomized block design was adopted, with six treatments and four replications. The treatments were lime doses of 0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0 and 20.0 Mg ha<sup>-1</sup>, inserted at a depth of 40 cm. The chemical attributes of the soil, leaf nutrient concentration and productivity of soybean and corn crops were monitored over four years of study. An analysis of variance (anova) was carried out on the data and, when relevant, regression analyzes were carried out using the R software. The calculation increased the pH and V% values and Ca and Mg contents by 0-20 and 20 - 40 cm, with greater increments in the upper layer. However, micronutrient levels in the soil were not modified by liming, with the exception of Fe levels in the first and second years, and B in the second year, which were reduced with increasing lime doses. In the leaves, the concentrations of B, Fe and Mn in soybeans (2020/21) and Fe in corn (2021/22) were reduced with the doses of lime, but remained above or within the range of values considered adequate, according to with literature standards. In the case of macronutrients, the concentrations of Ca in soybean leaves and Mg in soybean and corn leaves were increased with the doses of lime. Crop productivity was affected by treatments and climatic conditions. Cultivated under water restrictions, only soybeans showed an increase in productivity with increasing doses. Corn did not respond to liming in any of the harvests. Over four years of study, liming had a residual effect on soil chemical attributes and crop response was associated with the rainfall regime during the cycle.

**Keywords:** Embedded limestone. Soil acidity. Grain production. Micronutrients.

## 1. INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um fator limitante à produtividade de diversas culturas. Lopes e Guimarães (2016) consideram solos com acidez elevada aqueles com  $\text{pH} < 5,0$ ; solos com acidez média, aqueles com  $\text{pH} 5,0$  a  $5,9$ ; e, com acidez leve,  $\text{pH} > 6,0$ . Em todo mundo, a estimativa é que existam 3,95 bilhões de hectares com solos ácidos, ou seja, cerca de 30% das áreas agricultáveis (Von Uexküll; Mutert, 1995), enquanto na América do Sul esse percentual corresponde a aproximadamente 85% do território (Fageria; Nascente, 2014). No Brasil, quase 70% dos solos apresentam  $\text{pH}$  inferior a 5,5 (Crespo-mendes; Laurent; Hauschild, 2019). No país, a produção de grãos está em grande parte concentrada na região do Cerrado, em áreas sob Latossolos e Argissolos (Santos et al., 2018), classes de solos altamente intemperizadas, com elevada acidez e baixa disponibilidade de nutrientes. Nas condições com baixos valores de  $\text{pH}$  há aumento da solubilidade de cátions de caráter ácido como o  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  e a capacidade de troca de cátions é baixa, com predomínio de cargas variáveis. Como consequência, os cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$  apresentam baixa disponibilidade (Fageria; Nascente, 2014; Lopes; Guilherme, 2016).

A correção dos solos é uma prática que visa reduzir a acidez do solo, minimizar ou eliminar os efeitos deletérios da presença de Al e Mn, bem como aumentar os teores de Ca e Mg para favorecer o desenvolvimento das culturas (Li et al., 2019; Wang et al., 2021; Enesi et al., 2023). O calcário é o corretivo de solo mais comumente empregado com essa finalidade em várias partes do mundo (Boyko et al., 2023; Hayes et al., 2016; Holland et al., 2018; Olego et al., 2021). É obtido da moagem de rochas calcíticas e dolomíticas, que possuem em sua composição carbonatos de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ). Em meio ácido e na presença de água, a dissociação do calcário libera cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ) e a base fraca  $\text{CO}_3^{2-}$  que irá formar os ânions  $\text{OH}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ , responsáveis pela neutralização de prótons  $\text{H}^+$  e redução dos teores fitotóxicos de  $\text{Al}^{3+}$  (Oliveira; Pavan, 1996).

Como a calagem pode melhorar as condições químicas tanto da camada de 0 a 20 cm, como também de 20 a 40 cm (Moraes et al., 2023), essa prática promove o crescimento de raízes nas camadas mais profundas do solo e, conseqüentemente, tem efeito direto sobre o acesso ao conteúdo de água do subsolo pelas raízes (Hammei; Summer; Shahandeh, 1985; Hayes et al., 2016). A deficiência de Ca e a toxicidade de Al são prejudiciais ao desenvolvimento de raízes em profundidades, limitando o acesso à água e nutrientes (Bossolani et al., 2022; Caires et al., 2008a, 2008b; Moraes et al., 2023). No Brasil, a maior parte das culturas são cultivadas em sistema de sequeiro, com janelas de plantio definidas em função da

distribuição das chuvas. Logo, as plantas estão sujeitas às adversidades climáticas, marcadas por picos de estiagem e altas temperaturas durante o ciclo das culturas (Cunningham, 2020). Dessa forma, práticas de manejo que maximizem o volume de solo explorado exercem influência direta sobre a resiliência das espécies cultivadas.

Os corretivos da acidez podem ser aplicados na superfície, sem incorporação, ou pode ser incorporado após sua distribuição. A aplicação apenas superficial é feita em áreas onde não se objetiva revolver o solo, como ocorre em sistemas de plantio direto (SPD), no entanto, os propósitos e a dinâmica da correção seguem padrões diferentes daqueles sob solo revolvido (Caires et al., 2010, 2015; Moreira et al., 2001). A incorporação do calcário é feita em situações de abertura de novas áreas e/ou reabertura de áreas onde não houve a aplicação da dose suficiente para correção, bem como nos casos em que a incorporação foi feita de forma inadequada. Atualmente, tem ocorrido no Brasil a conversão de áreas de pastagens degradadas para áreas de produção de grãos, o que exige a incorporação do calcário antes do estabelecimento do SPD (Auler et al., 2019; Caires; Barth; Garbuio, 2006; Moreira et al., 2023; Santos et al., 2018). Considerando-se a baixa solubilidade do calcário ( $0,014 \text{ g L}^{-1}$  para  $\text{CaCO}_3$  e  $0,106 \text{ g L}^{-1}$  para  $\text{MgCO}_3$ ) (Alcarde, 1992) e a mobilidade limitada no perfil do solo (Minato et al., 2023; Soratto; Crusciol, 2008a), a profundidade de incorporação (Gonzalez-erico et al., 1979), os implementos utilizados (Prado, 2003) e a dose recomendada (Moraes et al., 2023) são decisivos para as respostas das culturas à calagem. As maiores produtividades de grãos das culturas têm sido obtidas com doses acima daquelas calculadas para elevação da V% a 70% (Fageria et al., 2013; Fageria; Baligar; Zobel, 2007; Moraes et al., 2023; Raij, 2011).

A utilização de altas doses de calcário são muitas das vezes criticadas devido ao potencial efeito da calagem na redução da disponibilidade dos micronutrientes. O aumento de pH pode reduzir a disponibilidade de formas solúveis de cátions metálicos, como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  (Auler et al., 2019; Bossolani et al., 2022; Fageria; Nascente, 2014). Contudo, esses efeitos nem sempre são evidenciados no campo, sobretudo, quando manejados em SPD onde a matéria orgânica (MO) acumulada em superfície influencia diretamente a maior ou menor disponibilidade desses elementos (Moreira et al., 2017). Como apontado na revisão de Hartemink e Barrow (2023), o pH isoladamente não pode ser utilizado para prever a disponibilidade de nutrientes em solução, pois fatores como MO, potencial redox, tipo de solo e clima afetam a forma dos elementos no solo, e as plantas também quanto aos mecanismos e estratégias de adaptação para a aquisição de nutrientes, como a regulação do pH da rizosfera, que pode diferir significativamente das demais regiões do solo.

Diante dessa abordagem, objetivou-se avaliar no presente trabalho o efeito de doses de calcário incorporadas a 0-40 cm sobre os atributos químicos do solo, disponibilidade de nutrientes e a produtividade de grãos das culturas de soja e milho ao longo de quatro anos. O trabalho de pesquisa foi guiado pelas hipóteses de que: i) doses de calcário acima das calculadas para elevação da V% a 70% são necessárias para a adequada correção dos solos; ii) as culturas anuais respondem positivamente ao aumento das doses de calcário aplicadas; iii) altas doses de calcário não afetam de maneira agronomicamente significativa a disponibilidade de nutrientes e o estado nutricional das culturas de soja e milho quando bem incorporadas no perfil do solo.

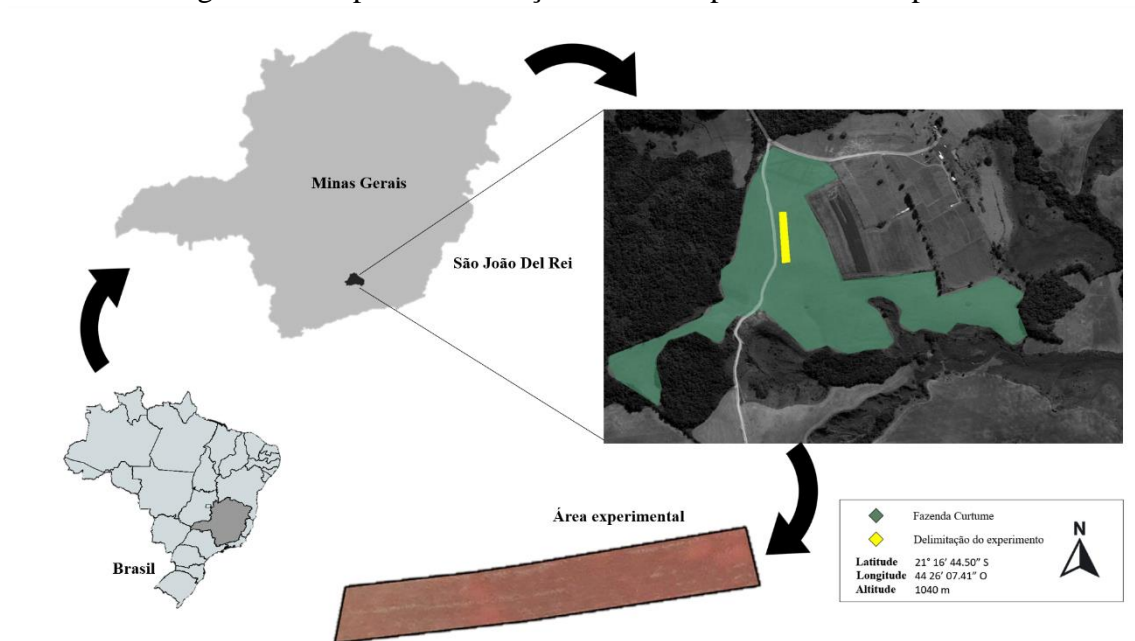
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área: localização, clima e solo

O experimento de campo foi instalado em dezembro de 2018, em um talhão da Fazenda Curtume, no distrito de São Sebastião da Vitória, município de São João Del Rei, na mesorregião do Campo das Vertentes, em Minas Gerais (Figura 1). Na época estava sendo feita a transformação da área com pastagem degradada para uma gleba para produção de grãos com culturas anuais.

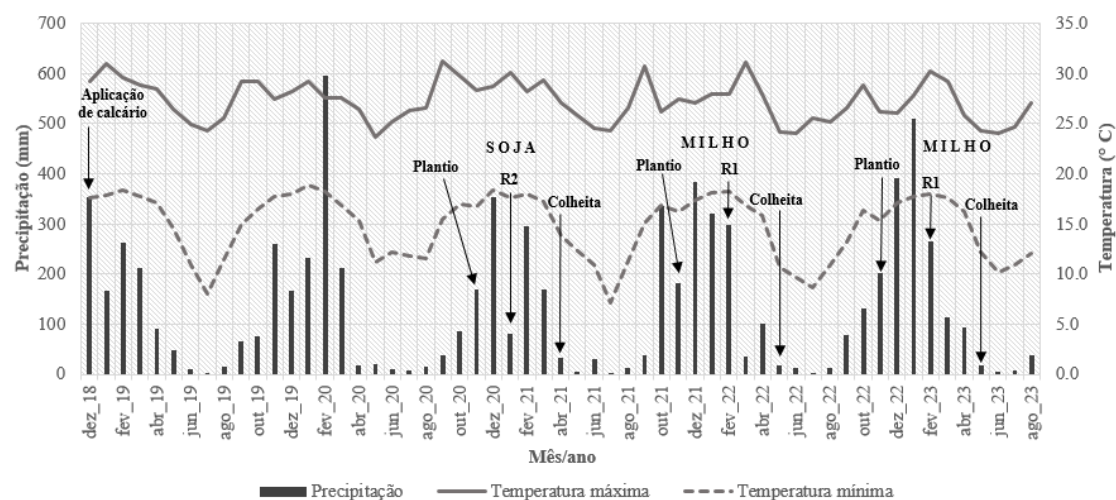
O clima da região é classificado como Cwb, segundo Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013). As estações do ano são bem definidas, com verão chuvoso e inverno seco. A precipitação média anual é de 1575 mm, com maior volume médio de chuvas no mês de dezembro (304 mm), e menor volume em agosto (14 mm). A temperatura média anual é de 17,9 °C. As condições climáticas no município durante o período de condução da pesquisa são apresentadas na Figura 2.

Figura 1 – Mapa de localização do município e da área experimental.



Fonte: Do autor (2024)

Figura 2 - Dados de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima entre os meses de dezembro de 2018 e agosto de 2023 em São João Del Rei – MG.



Fonte: Do autor (2024), dados extraídos do INMET.

Desde a implantação do experimento até a última amostragem de solo foram registrados 7377,0 mm de precipitação acumulada, os quais ficaram distribuídos em: 2622 mm da implantação até a primeira amostragem de solo, 1259,0 mm entre a primeira e a segunda amostragem de solo, 1683,0 mm entre a segunda e a terceira amostragem e 1813,0 mm da terceira até a quarta e última amostragem de solo.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Argiloso, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e como Typic Hapludox na classificação Americana (Soil survey staff, 2014). Antes da instalação do experimento, foram retiradas amostras nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm para determinação da fertilidade química e textura do solo de estudo (TABELA 1).

Tabela 1 - Propriedades químicas do solo antes da implantação do experimento.

(Continua)

Profundidade	pH	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V%
cm	H <sub>2</sub> O	----	mg dm <sup>-3</sup>	----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	-----		%
0 – 20	5,0	0,2	7,8	33,8	1,1	0,4	0,2	3,7	5,3	30,2
20 - 40	4,7	0,2	7,2	22,4	0,9	0,2	0,2	3,2	4,4	26,8

Tabela 1 - Propriedades químicas do solo antes da implantação do experimento.  
(Conclusão)

	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Argila	Silte	
	%	mg dm <sup>-3</sup>				dag kg <sup>-1</sup>			
0 - 20	3,4	0,3	1,1	45,1	9,9	0,5	63,8	25,7	10,6
20 - 40	3,7	0,2	1,0	39,6	6,1	0,3	64,0	25,3	10,8

pH em H<sub>2</sub>O (1:2,5); P, K, Cu, Fe, Mn e Zn em solução Mehlich-1 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup> + 0,05 mol L<sup>-1</sup> HCl); S em Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; Ca, Mg e Al - KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; H+Al (acidez potencial) estimada pelo método SMP; T (Capacidade de troca catiônica a pH 7,0) = (Ca+Mg+K=Na+H+Al); V% (Saturação por bases) = ((Ca+Mg+K) / T) \* 100; MO (matéria orgânica) em Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 mol L<sup>-1</sup>; B em água quente.

Fonte: Do autor (2024)

## 2.2 Caracterização e condução do experimento

O experimento foi conduzido sob um delineamento em blocos casualizados (DBC), com seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por doses de calcário incorporadas, sendo: 0 - controle, 4,0; 8,0; 12,0; 16,0 e 20,0 Mg ha<sup>-1</sup> (megagramas por hectare, equivalente a tonelada por hectare).

Cada unidade experimental foi formada por 20 m de comprimento e 10 m de largura, totalizando-se 200 m<sup>2</sup> por parcela, ou seja, 800 m<sup>2</sup> por tratamento em todo o estudo. A área delimitada para o experimento totalizou-se 4800 m<sup>2</sup>. A adoção de parcelas nessas dimensões teve por objetivo minimizar o erro associado à contaminações entre as doses de calcário aplicadas de forma mecanizada. A aplicação do calcário foi feita uma única vez, na implantação, com o distribuidor Bruttus 6000®, com faixa nominal de aplicação de 4,37 m e altura de trabalho de 1,30 m. A distribuição pelo equipamento ocorre pela ação gravitacional. O corretivo é deslocado por uma esteira na parte inferior e depositado no solo por queda livre entre lonas defletoras, minimizando as perdas do corretivo pelo arraste horizontal de partículas menores. A incorporação do calcário foi feita logo após a aplicação, com duas passagens de grade da marca Tatu®, com 16 discos de 32 polegadas, espaçados em 360 mm.

O calcário utilizado apresentava reatividade (RE) de 89,5%, poder de neutralização (PN) de 103,1%, poder relativo de neutralização total (PRNT) de 92,3%, com 31,7% de CaO e 9,5% de MgO. A quantidade de partículas passantes nas peneiras de 2,0, 0,84 e 0,30 mm foram 100%, 96,5% e 77,3%, respectivamente.

### ***2.3 Condução das culturas***

Após a instalação do experimento, as escolhas de culturas e os manejos de adubação e controle fitossanitário foram definidos pelo produtor. Na safra 2019/20 foi implantada soja, no entanto, a semeadura foi realizada de modo tardio e as condições climáticas não favoreceram o desenvolvimento da cultura. Portanto, a primeira cultura não é considerada neste estudo. Na safra 2020/21 foi cultivada soja, seguida de pousio no outono-inverno. Nas safras 2021/22 e 2022/23 foi cultivado milho, também com a opção pelo pousio em sucessão. O espaçamento entre linhas adotado foi de 60 cm para todas as culturas. A Tabela 2 apresenta o histórico dos manejos adotados na área ao longo dos anos de avaliação.

### ***2.4 Análise de folhas e produtividade***

Para todas as avaliações realizadas foram adotadas bordaduras de no mínimo 2 m em cada dimensão da parcela. A amostragem de folhas foi realizada durante o florescimento das culturas. Na soja, foram retiradas 10 folhas no estágio R2 (florescimento pleno) conforme a escala de Fehr e Caviness (1977), coletando-se o terceiro trifólio com pecíolo, contado do ápice da planta para a base, conforme Martinez, Carvalho e Souza (1999). No milho, safra 2021/22, as amostragens foram feitas no estágio R1 (florescimento feminino, emissão dos estilo-estigma, na escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993)), conforme Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Foram retiradas 10 folhas inteiras por parcela, coletando-se a folha abaixo e oposta à inserção da espiga principal em desenvolvimento. As amostras de folhas foram secas em estufa a 65 °C por 72 h. Após a secagem, as amostras foram moídas e enviadas para a análise. As concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn no tecido vegetal foram determinadas seguindo-se procedimentos estabelecidos por Silva et al. (2009).

### ***2.5 Análises de solos***

Amostras de solos foram coletadas nos anos de 2020, 2021, 2022 e 2023, sempre ao final da colheita da cultura de verão, dessa forma, realizadas entre os meses de abril a julho de cada ano. As amostragens foram realizadas com um trado holandês com diâmetro interno de 5 cm, com estratificação das camadas de 0 a 20 e a 20 a 40 cm. Foi retirada uma amostra composta por parcela para cada profundidade, obtida a partir da mistura e homogeneização de cinco amostras simples. As amostras foram retiradas na porção central de cada uma das parcelas,

coletando-se duas amostras simples na linha de cultivo e três amostras simples na entrelinha. O procedimento foi o mesmo para ambas as profundidades.

Após as coletas as amostras foram secas em estufa a 40 °C, destorroadas e passadas na peneira de 2 mm (Terra Fina Seca em Estufa – TFSE). Após esse pré-processamento, foram submetidas às análises, cujas extrações seguiram as metodologias sugeridas por Silva (2009) e Teixeira et al. (2017). A acidez ativa foi determinada em água (pH H<sub>2</sub>O) na relação solo:solução de 1:2,5. Os cátions trocáveis Ca, Mg e Al foram extraídos pela solução KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, com 10 cm<sup>-3</sup> de terra em 100 da solução extratora. A solução de Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>) foi utilizada para a determinação de K e Na trocáveis, na relação de 1:10 de solo:solução. A mesma solução também foi utilizada para a extração dos teores de micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn, na proporção de 1:5. O boro foi extraído em água quente. A acidez potencial (H + Al) foi determinada em solução SMP. Os parâmetros SB, t, T, V% e m% foram calculados conforme as equações descritas em Teixeira et al. (2017).

## ***2.6 Análise dos dados***

Os dados coletados foram inicialmente tabulados em planilha Excel. Posteriormente, com uso do software R (versão 4.3.0) foram feitas análises exploratórias sobre o banco de dados. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F (p-valor < 0,05) e, quando significativos, foi feito o estudo da regressão. A escolha dos modelos foi feita em função do maior coeficiente de determinação significativo (R<sup>2</sup>). Foram realizados testes de correlação de Spearman entre variáveis de solo e produtividade das culturas para cada ano. Os resultados foram compilados em matrizes de correlação para facilitar a visualização. As figuras foram geradas usando o pacote ggplot2 no software R. O balanço hídrico das culturas foi extraído diretamente pelo site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), na base de dados SISDAGRO (Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária), selecionando-se o local de cultivo, a cultura e o ciclo estimado, as datas de semeadura e colheita e o tipo de solo. Os resultados foram processados no Excel.

Tabela 2 - Dados referentes aos cultivos de soja e milho entre os anos de 2019 e 2023.

Safr	Cultura	Cultivar	Densidade	Plantio	Colheita	Adubaçã			Formulad oNPK	Época
						N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		
			plantas ha <sup>-1</sup>			Kg ha <sup>-1</sup>				
2019/20	Soja	RK 7518	-	28/11/2019	-	28,6	140,4	0,0	11-54-00	Plantio
						0,0	0,0	174,0	00-00-58	Cobertura
2020/21	Soja	KWS 8115	220000	27/11/2020	16/04/2021	39,0	99,0	0,0	13-33-00	Plantio
						0,0	0,0	116	00-00-58	Cobertura
2021/22	Milho	P4285	72000	22/11/2021	05/05/2022	17,0	78,2	0,0	10-46-00	Plantio
						92,0	0,0	0,0	46-00-00	Cobertura
						0,0	0,0	116,0	00-00-58	Cobertura
2022/23	Milho	P3707	72000	19/11/2022	05/05/2023	12,5	50,0	0,0	10-40-00	Plantio
						138,0	0,0	0,0	46-00-00	Cobertura
								83,5	00-00-58	Cobertura

Manejo na entressafra: após a colheita da soja foram aplicados em área total: 2000 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de cálcio (16% Ca e 13% S), para o fornecimento de enxofre, e 3,8 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco aviário (3% N, 3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 2% K<sub>2</sub>O). Após a colheita do milho safra 2021/22 foram aplicados 100 kg ha<sup>-1</sup> de KMag® (10% Mg, 21% K e 21% de S) e 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco aviário (3% N, 3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 2% K<sub>2</sub>O).

Fonte: Do autor (2024)

### 3. RESULTADOS

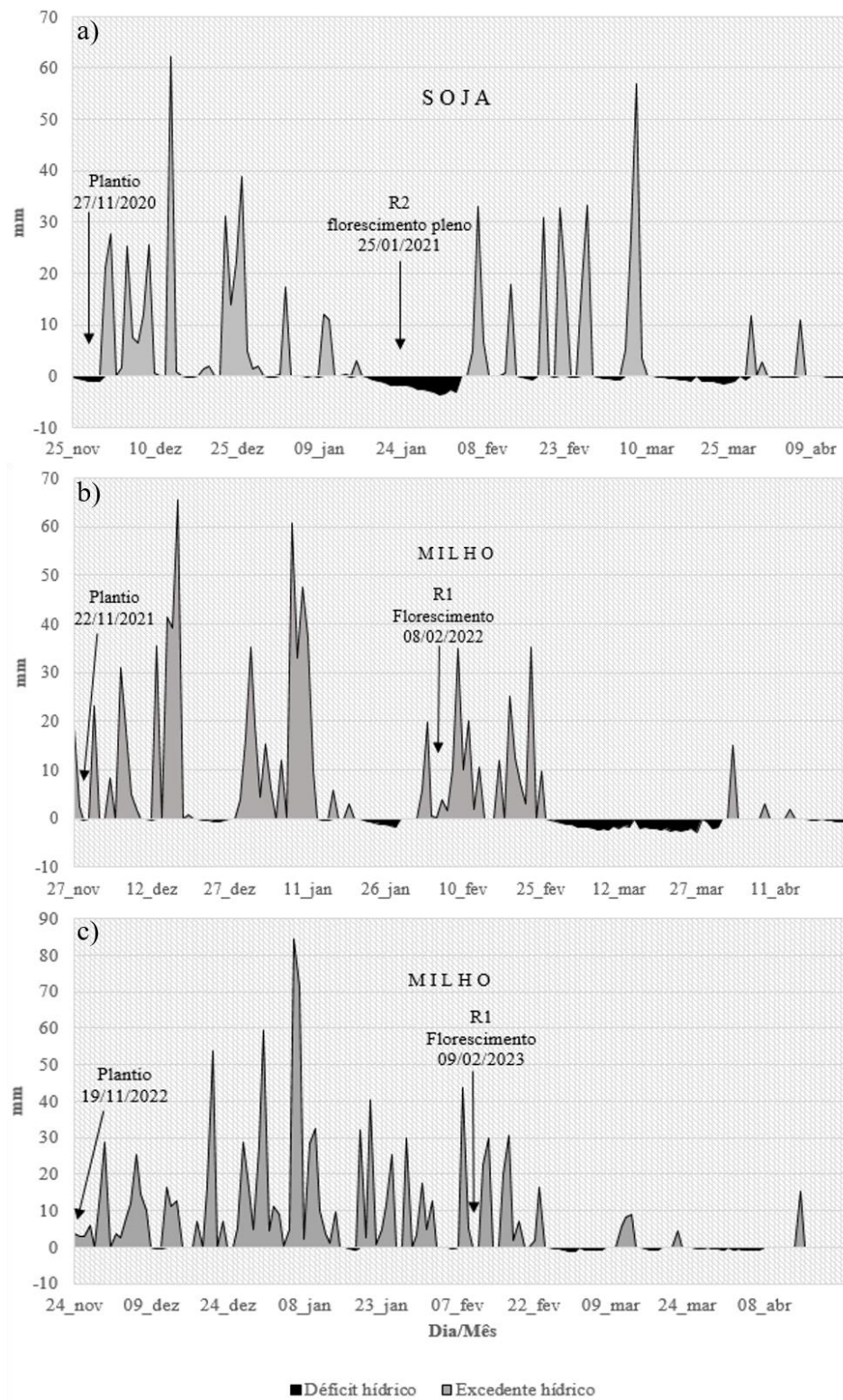
#### 3.1 *Balanço hídrico de culturas*

Do ponto de vista da disponibilidade hídrica, as safras foram bastante distintas (Figura 3). Na safra 2020/21 houve o menor volume de precipitação acumulada, que ocorreu de forma equilibrada entre as fases vegetativa e reprodutiva da cultura da soja, porém, com um longo período sem chuvas na fase crítica de florescimento da cultura (Figura 3a). Desde a semeadura da soja até o momento da colheita (141 dias), foram registrados 918,8 mm de precipitação. Do total, 433,4 mm ocorreram durante a fase vegetativa e 485,4 mm entre o florescimento até a colheita da cultura. O mês de janeiro apresentou precipitação abaixo da média histórica (INMET, 2023), com apenas 80,4 mm registrados entre o 1º e o 16º dia. A partir dessa data, a cultura na fase de florescimento passou por um período de restrição hídrica (veranico) que perdurou por 18 dias, com as chuvas sendo reestabelecidas a partir de 04/02/2021.

Na safra 2021/22 a precipitação acumulada foi superior ao que foi registrado na safra anterior. No entanto, quase 70% do total das chuvas ocorreram durante a fase vegetativa do milho (Figura 3b). O milho cultivado na safra 2021/22 permaneceu no campo por 165 dias. Ao longo desse período, foram contabilizados 1169,0 mm de precipitação, sendo 800,4 mm de chuva entre a semeadura e o estágio R1 (florescimento feminino) da cultura. A partir do florescimento (R1) até a colheita, choveu 368,6 mm. Isto porque as chuvas concentraram-se nos meses de dezembro (383,4 mm), janeiro (321,4 mm) e fevereiro (298,0 mm). O mês de fevereiro da safra 2021/22 apresentou média ligeiramente superior aos observados nas safras 2020/21 e 2022/23. Contudo, entre os dias 26/02/22 e 31/03/22 (34 dias), foram registrados apenas 34,4 mm, com 29,4 mm registrados em apenas dois dias durante o período. O intervalo coincidiu com a fase de enchimento de grãos da cultura, conforme a Figura 3b.

A precipitação acumulada na safra 2022/23 foi superior às observadas nas safras anteriores, sendo 1450,4 mm durante os 168 dias que a cultura do milho permaneceu no campo (Figura 3c). No entanto, grande parte desse volume foi concentrado nos meses de dezembro (390,4 mm) e janeiro (511 mm). Assim, 1064,2 mm foram registrados até o florescimento da cultura (R1). Do florescimento até a colheita, choveu 386,2 mm, ou seja, volume semelhante ao ocorrido neste mesmo estágio da cultura na safra anterior. Essa foi a safra com o maior volume de chuvas durante o ciclo da cultura de verão e a que apresentou maior suficiência hídrica para as plantas, não sendo identificados períodos críticos de limitação de acesso a água (Figura 3c).

Figura 3 - Balanço hídrico das culturas de soja e milho nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23.



Fonte: Do autor (2024)

### ***3.2 Efeitos das doses de calcários nos valores de pH do solo e saturação por bases e nos teores de cálcio e magnésio***

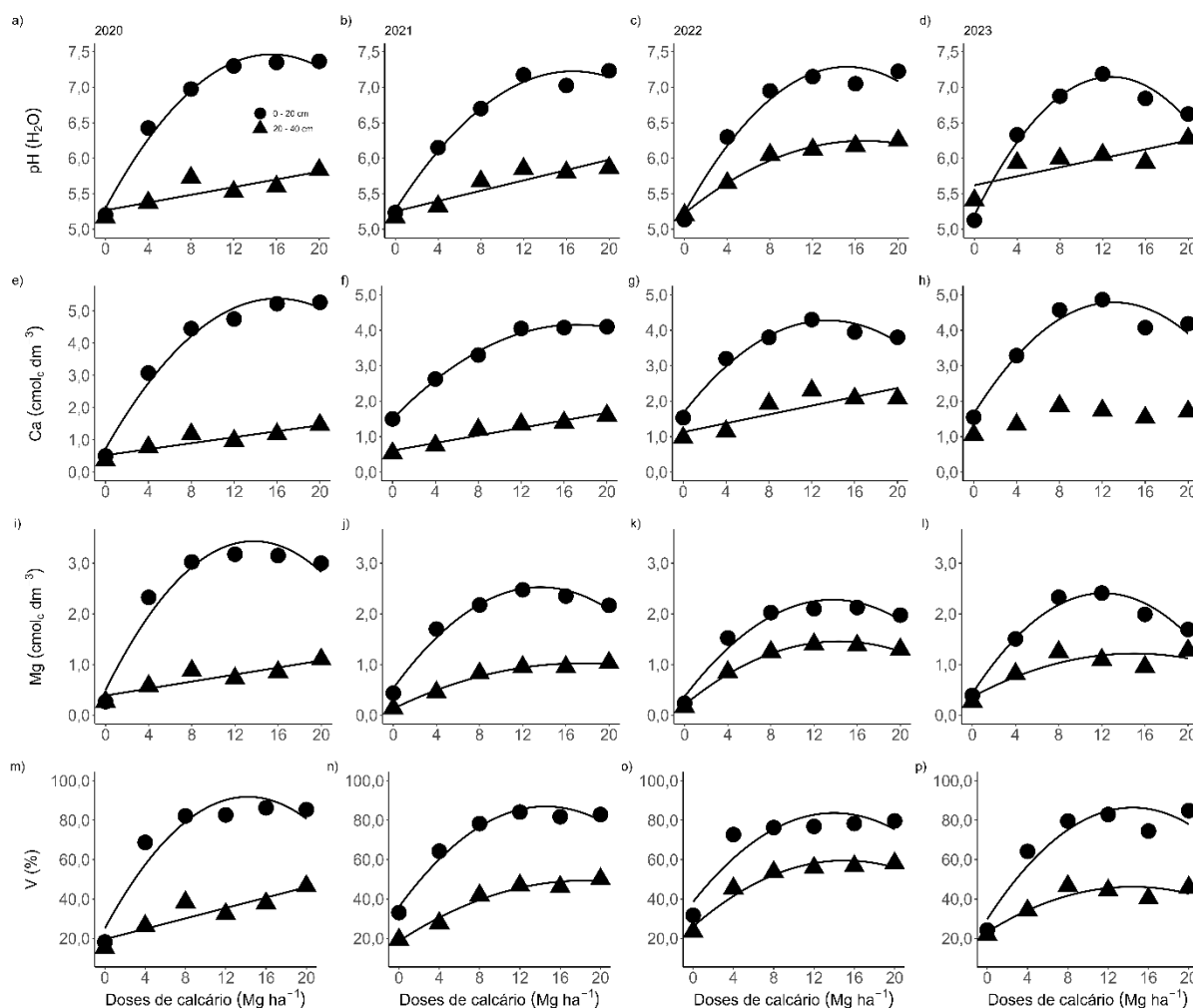
A calagem aumentou os valores de pH (H<sub>2</sub>O) e V% e os teores de Ca e Mg nas duas profundidades, os quais se mantiveram relativamente constantes durante os quatro anos de avaliações (Figura 4). Os modelos estatísticos associados a cada variável da Figura 4 estão apresentados no Apêndice A deste capítulo. Os maiores efeitos na redução da acidez ocorreram na camada de 0-20 cm, sendo os valores de pH, em média, 1,3, 1,0, 0,7 e 0,6 unidades superiores aos valores observados na profundidade de 20-40 cm nos anos de 2020 a 2023 (Figuras 4a, 4b, 4c e 4d). O modelo quadrático apresentou o melhor ajuste para o comportamento de pH em função das doses de calcário na camada de 0-20 cm, para todos os anos de avaliações. Na camada de 20-40 cm, com exceção das observações no ano de 2022, o modelo linear foi o que melhor expressou as variações obtidas com o incremento das doses. Nesta camada subsuperficial, foi observada uma tendência de elevação do pH nos anos subsequentes à aplicação do calcário.

Os maiores valores de Ca na camada de 0-20 cm foram estimados em 5,4 (2020), 4,2 (2021), 4,3 (2022) e 4,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (2023) (Figuras 4e, 4f, 4g e 4h). A calagem também elevou os teores de Ca na camada de 20-40 cm de 2020 a 2022, sem alteração no ano de 2023.

Da mesma forma, no caso do Mg da camada de 0-20 cm, os maiores teores foram observados no primeiro ano. Os valores máximos estimados foram 3,4 (2020), 2,5 (2021), 2,3 (2022) e 2,4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (2023) (Figuras 4i, 4j, 4k e 4l). Na camada de 20-40 cm os incrementos em Mg também foram observados, porém, de forma menos expressiva e se mantiveram relativamente constantes ao longo dos anos.

Quanto ao V% da camada de 0 a 20 cm, houve comportamento bastante semelhante ao longo dos quatro anos em função das doses de calcário (Figuras 4m, 4n, 4o e 4p). No primeiro ano, o V% variou de 18,2% no tratamento controle até 86,3%. No entanto, assim como foi observado para Ca e Mg, houve um achatamento da curva de regressão a partir da dose de 8 Mg ha<sup>-1</sup>. No primeiro ano, o V% foi de 82,2 (8,0), 82,7 (12,0), 86,3 (16,0) e 85,4% (20,0 Mg ha<sup>-1</sup>). Nos anos seguintes, a V% observada variou entre 33,1 a 84,1% (2021), 31,7 a 79,7% (2022) e 24,2 a 84,9% (2023). Na camada subsuperficial, os valores da V% também aumentaram, com máximos de 46,5% (2020), 50,1% (2021), 59,5% (2022) e 46,2 % (2023).

Figura 4 - Valores de pH, Ca, Mg e V% nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, em função de doses de calcário, entre os anos de 2020 a 2023.



Fonte: Do autor (2024)

### 3.3 Teores de micronutrientes no solo na profundidade de 0 a 20 cm, em função das doses de calcário

Com exceção dos teores de boro (ano de 2021) e de ferro (anos de 2020 e 2021), os teores de micronutrientes no solo não foram afetados pelas doses de calcário aplicadas (Tabela 3), apesar do aumento dos valores pH provocados pela calagem (Figura 4). Os teores de boro reduziram-se linearmente com as doses de calcário aplicadas (Tabela 3), cuja disponibilidade mínima estimada pelo modelo foi de 0,16 mg dm<sup>-3</sup>, na dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Os teores de ferro reduziram-se linearmente com a calagem em 2020, com queda superior a 30 %. Em 2021, a

redução seguiu uma função quadrática, com ponto mínimo da parábola de 27,8 mg dm<sup>-3</sup> de ferro, estimado com a dose de 18 Mg ha<sup>-1</sup>.

### ***3.4 Concentração de nutrientes foliares, em função das doses de calcário***

A calagem promoveu aumento nas concentrações foliares de Ca e Mg na cultura da soja (TABELA 4). Modelos de regressão quadrática foram ajustados aos dados obtidos. A concentração máxima de cálcio na folha foi observada com a dose de 20,0 Mg ha<sup>-1</sup>, correspondendo a 8,2 g kg<sup>-1</sup>. Quanto ao Mg, conforme a equação de regressão, a concentração máxima na folha foi estimada em 3,5 g kg<sup>-1</sup>, na dose de 17,9 Mg ha<sup>-1</sup>. As concentrações de N, P, K e S nas folhas de soja não foram alterados pelas doses de calcário aplicadas.

As concentrações foliares de Mg no milho (2021/22) foram elevadas pelas doses de calcário (TABELA 4). A concentração máxima de Mg na folha foi estimada em 3,3 g kg<sup>-1</sup>, na dose de 13,3 Mg ha<sup>-1</sup>. Também foram observados aumentos de S nas folhas do milho e a concentração máxima (2,5 g kg<sup>-1</sup>) foi estimada na dose de 12,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Os teores de N, P, K e Ca não apresentaram diferenças significativas em função dos tratamentos.

Com exceção das concentrações foliares de cobre e zinco na soja que não foram afetados pela calagem, as concentrações de boro, ferro e manganês foram reduzidas com o aumento das doses (TABELA 5). Os níveis de B nas folhas da soja decresceram com a elevação das doses, com concentrações mínimas de 47,4 mg kg<sup>-1</sup>, estimadas pela equação de regressão com a dose de 16,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Para o Fe, o modelo de predição atingiu concentrações mínimas de 206,8 mg kg<sup>-1</sup>, com a dose de 18,9 Mg ha<sup>-1</sup>. A concentração de Mn decresceu com as doses aplicadas, atingindo valores mínimos estimados em 127,0 mg kg<sup>-1</sup>, na dose de 14,3 Mg ha<sup>-1</sup>.

Tabela 3 - Efeitos das doses de calcário sobre os teores de micronutrientes no solo.

Doses de calcário Mg ha <sup>-1</sup>	(Continua)				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm <sup>-3</sup>				
	<b>2020</b>				
0	0,2	1,0	33,8	8,8	0,5
4	0,2	0,9	30,5	7,5	0,6
8	0,2	0,7	23,9	9,3	0,5
12	0,2	0,6	25,5	9,1	0,6
16	0,2	0,6	24,1	9,5	0,5
20	0,2	0,5	23,5	8,8	0,5
Efeito	NS	NS	Y = -0,4958x + 31,8452	NS	NS
R <sup>2</sup>	-	-	0,75**	-	-
C.V.(%)	26,6	34,5	18,0	25,3	15,3
	<b>2021</b>				
0	0,3	0,9	35,7	6,5	0,5
4	0,4	0,8	32,9	6,7	0,4
8	0,3	0,6	30,8	7,8	0,4
12	0,1	0,5	28,0	7,6	0,4
16	0,2	0,6	28,0	8,0	0,4
20	0,2	0,6	28,0	8,2	0,4
Efeito	Y = -0,0087x + 0,3438	NS	Y = 0,0250x <sup>2</sup> - 0,8995x + 35,8884	NS	NS
R <sup>2</sup>	0,63***	-	0,98*	-	-
C.V.(%)	22,9	25,7	7,0	22,4	23,9
	<b>2022</b>				
0	0,5	0,9	34,7	7,7	0,5
4	0,5	0,9	34,1	8,1	0,5
8	0,4	0,8	36,2	8,6	0,5
12	0,4	0,7	32,5	7,7	0,5
16	0,4	0,7	31,7	8,0	0,5

Tabela 3 - Efeitos das doses de calcário sobre os teores de micronutrientes no solo.

Doses de calcário	(Conclusão)				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
20	0,5	0,8	28,6	7,8	0,5
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS
R <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
C.V.(%)	20,9	29,1	15,9	23,1	14,1
<b>2023</b>					
0	0,6	1,4	56,3	9,9	0,4
4	0,6	1,1	54,6	13,2	0,7
8	0,5	0,8	65,6	14,6	0,5
12	0,6	0,7	63,7	12,6	0,5
16	0,5	0,9	57,9	11,4	0,4
20	0,5	1,1	55,4	12,9	0,5
Efeito	NS	NS	NS	NS	NS
R <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
C.V.(%)	8,7	42,3	22,8	28,1	29,0

Significância do teste de F para o modelo: *NS* (não significativo)  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

Fonte: Do autor (2024)

Tabela 4 - Concentração de macronutrientes no tecido foliar das culturas de soja e milho em função das doses de calcário.

Doses de calcário	N	P	K	Ca	Mg	S
Mg ha <sup>-1</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
---						
<b>Soja (safra 2020/21)</b>						
0	35,6	2,5	24,8	5,1	2,6	2,5
4	35,5	2,4	25,2	6,2	2,8	2,6
8	35,7	2,5	24,6	7,1	3,2	2,8
12	36,7	2,3	24,5	7,6	3,5	2,8
16	36,1	2,5	24,2	8,0	3,5	2,8
20	38,0	2,4	24,9	8,2	3,5	2,8
Efeito	NS	NS	NS	Y = -0,0072x <sup>2</sup> + 0,2995x + 5,0652	Y = -0,0031x <sup>2</sup> + 0,1112x + 2,5089	NS
R <sup>2</sup>	-	-		0,99*	0,98**	
C.V.(%)	5,6	6,0	4,3	8,6	5,9	5,4
<b>Milho (safra 2021/22)</b>						
0	26,8	1,5	21,6	4,1	2,0	2,1
4	27,5	1,8	23,2	4,2	3,0	2,4
8	28,9	1,8	21,2	4,4	3,1	2,5
12	32,7	1,5	19,3	4,6	3,2	2,6
16	32,3	1,7	21,4	4,2	3,1	2,4
20	28,1	1,9	23,1	4,3	3,1	2,4
Efeito	NS	NS	NS	NS	Y = -0,0065x <sup>2</sup> + 0,1732x + 2,1214	Y = -0,0029x <sup>2</sup> + 0,0695x + 2,1223
R <sup>2</sup>	-	-	-	-	0,85**	0,81**
C.V.(%)	13,9	16,2	9,2	10,3	12,5	7,0

Significância do teste de F para o modelo: NS (não significativo)  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

Fonte: Do autor (2024)

Tabela 5 - Concentrações de micronutrientes no tecido foliar das culturas de soja e milho em função das doses de calcário.

Doses de calcário	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Mg ha <sup>-1</sup>	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
<b>Soja (safra 2020/21)</b>					
0	61,4	10,1	295,5	213,6	98,4
4	56,4	9,8	226,6	167,6	83,4
8	51,4	9,7	242,1	139,2	83,8
12	47,8	9,8	222,2	131,1	79,1
16	46,8	9,8	212,0	134,5	78,7
20	48,8	10,0	202,3	136,3	83,6
Efeito	0,0572x <sup>2</sup> - 1,8263x + 61,9777	NS	Y = 0,2154x <sup>2</sup> - 8,0914x + 282,7518	Y = 0,4092x <sup>2</sup> - 11,7089x + 210,7679	NS
R <sup>2</sup>	0,99**	-	0,81**	0,98***	-
C.V.(%)	7,1	5,1	3,2	8,6	10,6
<b>Milho (safra 2021/22)</b>					
0	9,6	15,1	155,7	63,6	42,0
4	9,6	15,7	155,8	54,4	57,3
8	7,7	14,9	146,0	55,9	52,2
12	9,1	15,6	157,4	48,9	48,8
16	8,7	14,8	140,3	48,3	46,4
20	8,6	15,0	175,3	47,6	43,0
Efeito	NS	NS	Y = 0,1620x <sup>2</sup> - 2,7900x + 159,2098	NS	NS
R <sup>2</sup>	-	-	0,43*	-	-
C.V.(%)	23,9	11,4	8,8	15,3	30,3

Significância do teste de F para o modelo: NS (não significativo) P&gt;0,05; \*P&lt;0,05; \*\*P&lt;0,01; \*\*\*P&lt;0,001.

Fonte: Do autor (2024)

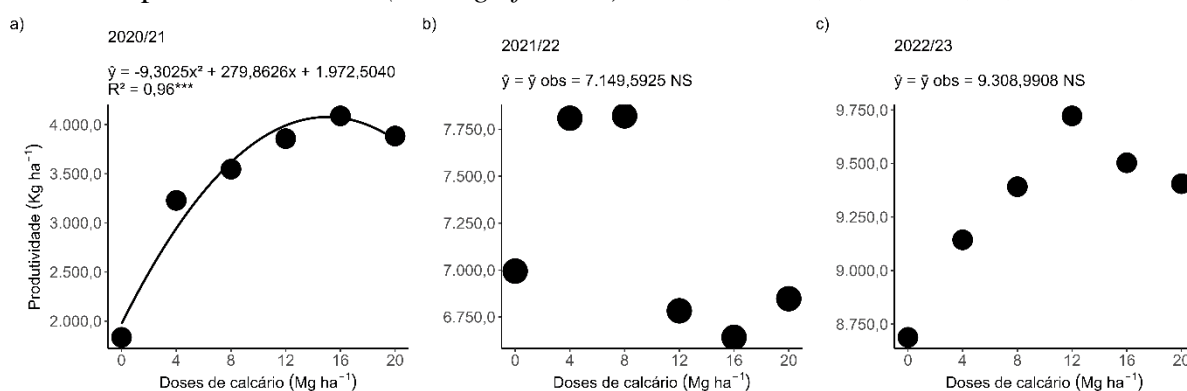
Na cultura do milho, com exceção da concentração de ferro, os demais micronutrientes não foram afetados pelas doses de calcário. A diminuição na concentração de Fe no tecido foliar em função das doses de calcário seguiu um modelo de regressão quadrático que, embora significativo, apresentou um baixo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Apesar da redução, não foram observados sintomas visuais de deficiência do elemento na cultura.

### 3.5 Produtividade e componentes agronômicos em função das doses de calcário

A calagem influenciou a produtividade da soja cultivada na safra 2020/21 (Figura 5a). A produtividade aumentou de forma quadrática, com máxima estimada em 4077 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup>, um incremento de 122% em relação ao tratamento controle, sem aplicação de calcário.

As produtividades do milho verão nas safras 2021/22 e 2022/23 não foram modificadas pela calagem (Figuras 5b e 5c). Na safra 2021/22, as produtividades variaram de 6642 a 7821 kg ha<sup>-1</sup>, com média geral de 7150 kg ha<sup>-1</sup>. O milho cultivado na safra 2022/23 apresentou maiores produtividades se comparado ao ano anterior, com médias variando entre 8688 e 9722, com média geral de 9309 kg ha<sup>-1</sup>.

Figura 5 - Efeito das doses de calcário nas produtividades de soja e milho. Significância do teste de F para o modelo: *NS* (não significativo)  $P > 0,05$ ;  $*P < 0,05$ ;  $**P < 0,01$ ;  $***P < 0,001$ .



Autor: Do autor (2024)

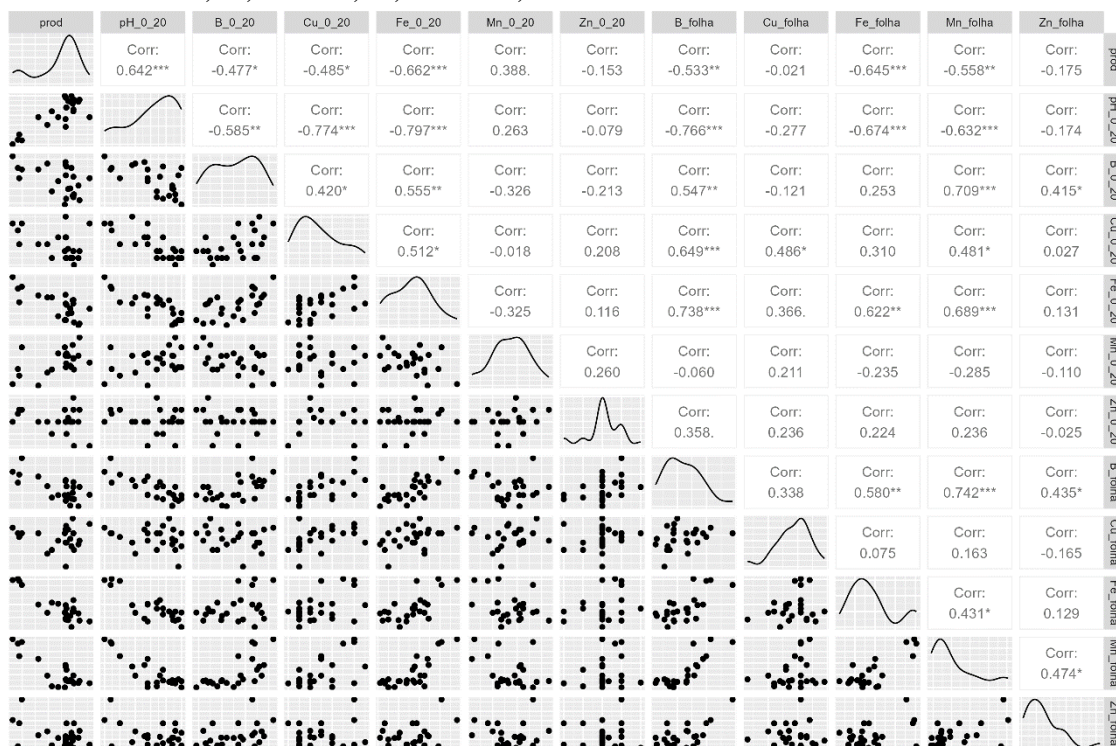
As doses de calcário promoveram um aumento significativo na altura das plantas de soja, mas não afetaram as plantas de milho (Apêndice B). Na safra 2021/22, houve aumento linear no peso de mil grãos (PMG) na cultura do milho com o aumento das doses de calcário aplicadas.

### 3.6 Correlação entre as produtividades, pH, teores de micronutrientes no solo e concentrações de micronutrientes nas folhas

A partir dos resultados de produtividade, teores de micronutrientes em solo e concentrações de micronutrientes em folhas nas culturas da soja e milho foram geradas as matrizes de correlação de Spearman (Figuras 6 e 7). A produtividade de soja foi correlacionada positivamente com os valores de pH do solo, mas os teores de B, Cu e Fe no solo e as concentrações de B, Fe e Mn nas folhas apresentaram correlação negativa com a produtividade de grãos. Por sua vez, a produtividade de grãos não se correlacionou com os teores de Mn e Zn no solo e com as concentrações de Cu e Zn nas folhas (Figura 6).

Os teores de micronutrientes B, Cu e Fe no solo correlacionaram negativamente com a elevação do pH e foram positivamente correlacionados com suas concentrações foliares. Por sua vez, as concentrações foliares de B, Mn e Zn na soja foram negativamente correlacionadas com o pH do solo. Os teores de Mn e Zn no solo não tiveram correlação com a concentração foliar.

Figura 6 - Matriz de correlação de Spearman entre o pH, os teores de micronutrientes no solo, concentrações no tecido vegetal e a produtividade da soja na safra 2020/21. Nível de significância: \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

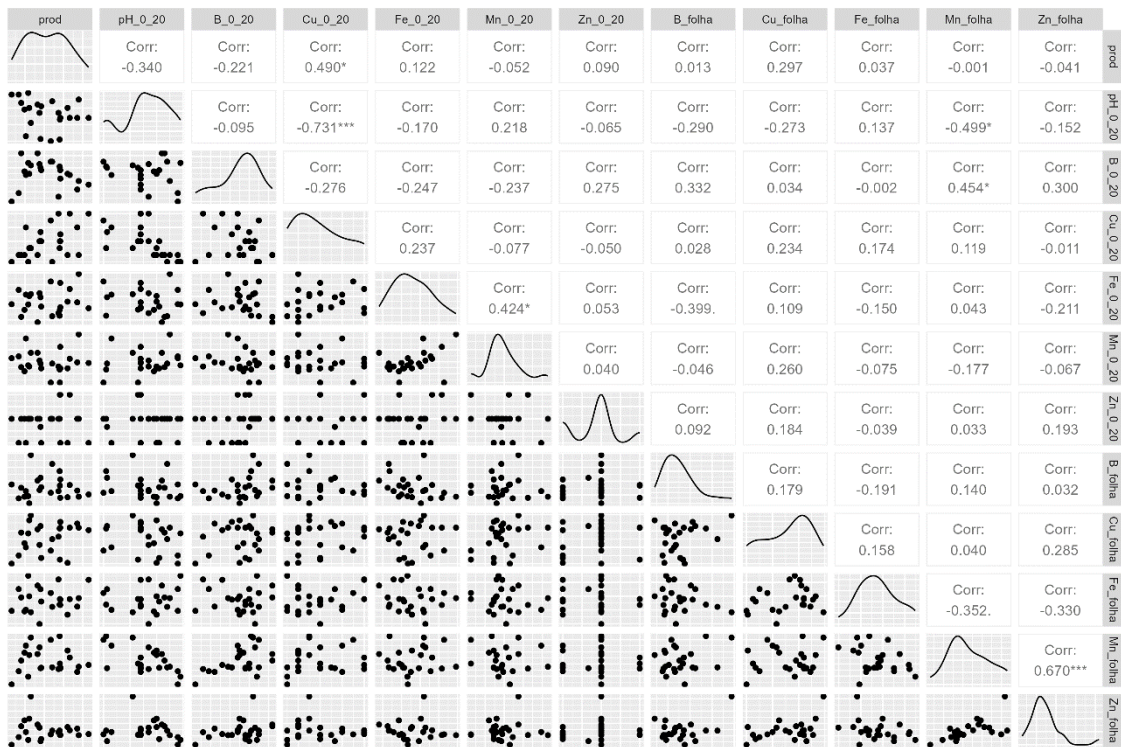


Fonte: Do Autor (2024)

No caso do milho cultivado na safra 2021/22, as produtividades de grãos não apresentaram correlações significativas com os teores de nutrientes no solo e com as

concentrações nas folhas (Figura 7). Por sua vez, o pH do solo apresentou correlação negativa com os teores de Cu no solo e com as concentrações de Mn na folha.

Figura 7 - Matriz de correlação de Spearman o pH, os teores de micronutrientes no solo, concentrações no tecido vegetal e a produtividade do milho na safra 2021/22. Nível de significância: \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .



Fonte: Do autor (2024)

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Atributos químicos do solo

As doses de calcário influenciaram positivamente os atributos químicos pH, Ca, Mg e V% nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm (Figura 4) e estes efeitos da calagem na melhoria dos atributos químicos do solo já são bem consolidados (Caires et al., 2008; Crusciol et al., 2019; Deus et al., 2020; Ernani; Bayer; Maestri, 2002; Fageria; Santos; Moreira, 2010; Kaminski et al., 2005; Moraes et al., 2023; Oliveira; Pavan, 1996; Pauletti et al., 2014; Santos et al., 2018; Vargas et al., 2019).

Os aumentos nos teores de Ca e Mg e nos valores de pH e V% ocorrem porque durante a dissociação do calcário, em meio ácido e na presença de água, ocorre a liberação dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , além da geração dos ânions bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), responsáveis pela neutralização dos íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  (Fageria; Baligar, 2008; Tiecher et al., 2023). Os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , adicionados pela calagem deslocam  $\text{Al}^{3+}$  dos sítios de adsorção, o qual é neutralizado pelos ânions  $\text{HCO}_3^-$  ou  $\text{OH}^-$ . Dessa forma, Ca e Mg passam a ocupar as cargas negativas da CTC, provocando o aumento dos teores absolutos no solo e, conseqüentemente, da V% (Fageria; Baligar, 2008; Tiecher et al., 2023; Warfvinge; Sverdrup, 1989).

A reação do calcário, a alteração nas propriedades químicas do solo e a resposta das culturas em produtividade são afetadas pela combinação de diversos fatores, como método de aplicação (Auler et al., 2019; Belinaso et al., 2021; Joris et al., 2016; Oliveira; Pavan, 1996), profundidade de incorporação (Farina; Channon, 1988; Gonzalez-érico, 1979), dose aplicada (Leite et al., 2006; Kaminski et al., 2005; Moraes et al., 2023), tipo e qualidade do corretivo (Aguiar et al., 2021; Deus et al., 2020; Haby; Leonardo, 2002), tipo, textura de solo e teor de matéria orgânica (Li et al., 2019; Pandolfo; Tedesco, 1996), regime de chuvas (Caires et al., 2008; Goulding, 2016) e tempo decorrido entre a aplicação e as avaliações (Caires et al., 2015; Santos et al., 2018; Vargas et al., 2019).

Após o primeiro ano da aplicação do corretivo (ano de 2020), os atributos pH, Ca, Mg e V% atingiram os maiores valores na camada de 0-20 cm comparativamente aos demais anos de avaliação (Figura 4). Esses resultados podem ser atribuídos à incorporação, que foi efetiva em promover o contato entre as partículas de calcário e solo (Joris et al., 2016) e ao PRNT do corretivo, que era superior a 90%, e, com isso, uma maior velocidade de reação era esperada (Heinrich; Sullivan; Moore, 2022). A incorporação profunda também foi capaz de promover alterações nos atributos químicos na 20-40 cm do solo, porém, os aumentos foram menores que

em superfície e podem estar relacionados com condições menos favoráveis à reação do calcário, como umidade e temperatura (Moraes et al., 2023), e ao menor revolvimento no subsolo (Fageria; Baligar; Zobel, 2007; Fageria; Stone; Moreira, 2008). Evidências de que a velocidade de reação é menor em profundidade são encontradas em nosso trabalho, visto que o pH, Ca, Mg e a V% da camada de 0-20 cm foi maior no primeiro ano, estabilizando a partir daí. Por outro lado, em subsuperfície foram observados aumentos entre o primeiro e o segundo ano e entre o segundo e o terceiro ano após a aplicação.

Em geral, os aumentos nos atributos químicos seguiram um modelo quadrático, semelhante ao que é relatado em trabalhos com doses de calcário (Fidalski; Tormena, 2005; Moraes et al., 2023; Rodrighero; Barth; Caires, 2015), portanto, a taxa de incremento não foi proporcional às doses aplicadas. Esse comportamento pode ser explicado, em partes, pela própria ação do pH controlando a taxa de reação do calcário, sendo menor à medida que o pH aumenta (Azam; Gazey, 2021; Warfvinge; Sverdrup, 1989). A movimentação de Ca e Mg com ânions acompanhantes ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e ácidos orgânicos de baixo peso molecular) no perfil de solo também poderia explicar parte das observações, ou seja, a partir de uma determinada dose e na presença de íons carreadores, a mobilidade de cátions e os produtos da dissolução do calcário poderiam ser intensificadas. Os efeitos do calcário em camadas mais profundas já foram relatados em vários trabalhos (Caires et al., 2001; Chaves; Pavan; Igue, 1984; Crusciol et al., 2011; Kaminski et al., 2005; Oliveria; Pavan, 1996; Santos et al., 2018a; Vargas et al., 2019) e podem ocorrer quando o pH na zona de dissolução do corretivo atinge a faixa de 5,2-5,5 (Rheinheimer et al., 2000), mas são dependentes da dose aplicada, precipitação, textura do solo, sistemas de cultivo e culturas envolvidas na rotação, presença de ânions carreadores, ocorrência de canais contínuos para percolação de água e do tempo após a aplicação (Amaral; Anghinoni; Deschamps, 2004; Franchini et al., 1999, 2001; Myazawa; Pavan; Franchini, al., 2002; Nunes et al., 2019; Oliveira; Pavan, 1996; Santos et al., 2018a). Por outro lado, a liberação de cargas negativas da CTC pela calagem diminui a mobilidade de cátions no solo e a presença de cátions de caráter ácido ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ ) consomem  $\text{OH}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ , limitando a movimentação desses ânions no perfil (Alleoni et al., 2005; Caires et al., 2008a). Sob um Latossolo vermelho escuro, Quaggio et al. (1993) observaram incrementos de Ca, Mg e pH nas profundidades de 20-40 e 40-60 cm após seis meses da incorporação de 9 Mg  $\text{ha}^{-1}$  de calcário a 26 cm. Contudo, os incrementos observados na camada de 20-40 cm do presente estudo não parecem indicar migração tão forte a ponto de justificar esse comportamento dos dados. No entanto, como estes atributos não foram avaliados em maiores

profundidades > 40 cm, essas suposições tem apenas caráter especulativo e requerem atenção futura.

O PRNT do calcário, expresso em percentual de equivalência ao  $\text{CaCO}_3$  puro, é calculado a partir do poder de neutralização (PN), que considera a natureza química do material corretivo, e a reatividade (RE), em função do grau de moagem da rocha. De forma simples, é uma estimativa do quanto do corretivo irá reagir no solo num período de três meses (Alvarez V.; Ribeiro, 1999). Porém, em condições de campo, o calcário continua reagindo por um período maior (Mello et al., 2003). No presente trabalho, houve resposta da aplicação do calcário durante todos os quatro anos de avaliações e, como foram registrados 7377,0 mm de precipitação da aplicação do corretivo até última amostragem de solo, esperava-se que todo o calcário tivesse reagido. Considerando-se que a cada mil quilos de calcário com 1% de CaO e 1% de MgO são acrescentados ao solo  $0,0179 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de Ca e  $0,0248 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de Mg na camada de 0 a 20 cm (Souza; Miranda; Oliveira, 2007), era esperado um aumento de 0,57 e 0,24  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de Ca e Mg a cada tonelada do corretivo (calcário com 31,7% de CaO e 9,5% de MgO). Portanto, na dose de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ , seriam esperados incrementos de 5,7 (Ca) e 2,4  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Mg) em todo o perfil de 0-40 cm, os quais não foram alcançados, com uma diferença ainda maior na camada de 20-40 cm (Figura 4).

No caso da V%, a dose calculada para elevar a V% a 70% na camada de 0-40 cm seria de  $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Com base na equação ajustada para as observações do primeiro ano (Figura 4), esta dose calculada somente elevaria a V% para 61,3 (camada 0-20 cm) e 25,6% (camada 20-40 cm). Com a mesma metodologia de recomendação, as doses de 8,0, 12,0, 16,0 e  $20,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  teriam a capacidade teórica de elevar a V% para 122, 183, 243 e 304% na camada de 0-40 cm, fato que também não aconteceu. Assim, os resultados do presente estudo confirmam o que já foi relatado por muitos autores, que a V% observada foi sempre inferior à V% calculada (Alleoni et al., 2005; Barbosa Filho; Fageria; Zimmermann, 2005; Fageria; Stone, 2004; Moraes et al., 2023; Neto et al., 2000; Raij et al., 1998).

A abordagem de que a reação do calcário é mais lenta do que a teorizada parece explicar melhor nossas observações. Em estudos no Cerrado brasileiro, foi estimado que o calcário com PRNT entre 50 e 70% reage cerca de 50% no primeiro ano, 30% no segundo ano e o restante no terceiro ano após a incorporação (Souza; Lobato, 2004). Também nessa região, em um trabalho sob um Latossolo vermelho, foi observado que 1/3 do calcário na dose de  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  ainda não havia reagido, mesmo após 30 meses da incorporação (Quaggio et al., 1982). Em outro trabalho, com doses de até  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  sob um Argissolo ácido, também foram encontrados quantidades apreciáveis de Ca+Mg residuais (não reagido) após um, seis e 20 meses da

incorporação de calcário calcinado e calcários de granulometria fina e grossa (Quaggio; Gallo; Mascarenhas, 1995). Como no presente estudo foram utilizadas doses superiores às relatadas nos outros estudos (Quaggio et al., 1982; Quaggio; Gallo; Mascarenhas, 1995), é de se esperar que uma maior quantidade de calcário tenha se mantido estável no solo. Isso ajuda a explicar o porquê de em muitos casos, são necessárias doses de calcário superiores às calculadas para se alcançar a V% desejada e também a produtividade máxima das culturas (Barbosa Filho; Silva, 2000; Camargo et al., 1982; Fageria, 2008; Fageria et al., 2013; Moraes et al., 2023; Raij et al., 1998; Raij, 2011).

#### ***4.2 Efeito da calagem sobre os micronutrientes no solo***

Embora os teores de micronutrientes no solo tenham sido pouco afetados pelas doses de calcário (Tabela 3), exceção do B e Fe, a redução da disponibilidade destes elementos em função do aumento de pH, provocado pela calagem é frequentemente alertada na literatura (Fageria; Nascente, 2014; Hooda, 2010; Kabata-pendias, 2001; Malavolta, 2006; Abreu; Lopes; Santos, 2007). Desse efeito, foi cunhado no Brasil o termo “supercalagem”, que designa o uso de doses excessivas de corretivos, com aumento exagerado de pH ao ponto de causar redução na disponibilidade de nutrientes no solo e prejuízos às culturas (Alvarez V.; Ribeiro, 1999). Contudo, considerações precisam ser feitas, pois essa situação nem sempre é evidenciada (Moreira et al., 2024). A relação pH e disponibilidade de elementos começou a ser estudada por Pettinger (1935), conforme relatado por Hartemink e Barrow (2023). No entanto, o diagrama proposto à época apresentava limitações em não considerar, dentre outros, os fatores de cultura, risco de deficiência ou toxidez de elementos, o potencial de oxi-redução e, portanto, isoladamente o pH não pode ser utilizado como ferramenta para prever formas disponíveis dos nutrientes em solução (Barrow; Hartemink, 2023; Hartemink; Barrow, 2023). Também é válido ressaltar que, em muitos casos, e, principalmente em áreas sem histórico de cultivo anterior, os teores originais de micronutrientes nos solos tropicais já se encontram abaixo dos níveis críticos antes da calagem (Moreira et al., 2024).

Os teores de B do solo foram reduzidos pela calagem apenas no segundo ano de avaliação (TABELA 3). O aumento de pH favorece a atividade microbiana e, conseqüentemente, aumenta a taxa de mineralização da MO. Dessa forma, seria esperado maior liberação de B no solo. Por outro lado, o aumento do pH também induz a dissociação de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) em ânion borato ( $H_4BO_4^-$ ), aumentando a adsorção, que é ainda favorecida pelo aumento de hidróxidos de Al recém precipitados com a calagem, os quais possuem alta capacidade em adsorver B (Goldberg, 1997; Goldberg et al., 2005; Malavolta, 2006). O

aumento da adsorção de B logo após a calagem é um fenômeno conhecido e temporário, pois, a partir do segundo ano da correção, os efeitos tendem a desaparecer (Rosolem; Biscaro, 2007). Fageria, Baligar e Zobel (2007) estudando a interação entre doses de calcário e adubação boratada, reportaram que, no primeiro ano, foram necessárias maiores doses de B (7,5 kg de B) para obtenção da máxima produtividade do feijoeiro quando submetido à dose de 24 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário, mas sem efeitos significativos da interação nos anos subsequentes. No presente estudo, o revolvimento do solo no primeiro ano para incorporação do calcário possivelmente aumentou a mineralização da MO e, conseqüentemente, houve maior liberação do elemento, o que pode ter ocultado uma eventual adsorção de B que possa ter ocorrido logo após a reação do calcário. No entanto, a redução ocorrida na segunda amostragem tem pouco efeito agrônômico, já que os teores no solo já se encontravam na classe de disponibilidade baixa (0,16 a 0,35 mg dm<sup>-3</sup>) e se mantiveram nesta classe de interpretação (Alvarez V. et al., 1999).

No caso do Fe, somente foram observadas reduções nos teores de Fe pela calagem nos dois primeiros anos após a calagem, sendo que a classe de interpretação da sua disponibilidade no solo foi alterada de bom ou adequado para teor médio. Nos anos seguintes os teores se mantiveram acima do nível crítico (NC) de 30 mg dm<sup>-3</sup> (Alvarez V. et al., 1999). O Fe é o micronutriente mais afetado pela elevação de pH, com reduções relatadas em uma grande quantidade de trabalhos (Auler et al., 2019; Ernani; Bayer; Maestri, 2002; Alleoni et al., 2005; Florentino et al., 2021; Moreira et al., 2024). É citado que o aumento de uma unidade de pH na faixa de 4 a 9 pode reduzir a solubilidade de Fe (formas Fe<sup>3+</sup> e Fe<sup>2+</sup>) de 100 a 1000 vezes (Lindsay, 1972; Fageria; Baligar; Clark, 2002). Como o Fe é o quarto elemento mais abundante na litosfera (Malavolta, 2006), não tem sido relatadas deficiências do nutriente e nem respostas das culturas às suas aplicações nos solos argilosos tropicais, pois apesar de haver redução com a calagem, os teores disponíveis costumam ser elevados (Fageria; Santos; Moreira, 2010; Lopes; Guilherme, 2016).

Os teores de Cu, Mn e Zn no solo não foram afetados pela calagem em nenhum dos anos de avaliação (Tabela 3), contrariando o que já foi relatado na literatura (Alleoni et al., 2005; Ernani; Nascimento; Oliveira, 1998; Olego et al., 2021), já que o aumento de uma unidade de pH pode reduzir em até 100 vezes a disponibilidade desses elementos (Fageria; Baligar; Clark, 2002; Fageria; Nascente, 2014) e, no presente estudo, em alguns tratamentos o pH foi superior a 7,0 (Figura 4). O Cu apresentou teores médios inferiores ao NC (NC = 1,2 mg dm<sup>-3</sup>), interpretados como baixo nos dois primeiros anos e médio nos dois últimos anos de avaliação. O Mn apresentou teores no solo de médio a adequado (NC = 8,0 mg dm<sup>-3</sup>). Por sua vez, os teores de Zn (NC = 1,5 mg dm<sup>-3</sup>) foram baixo ou muito baixo nos quatro anos de estudo (Alvarez

V. et al., 1999), o que pode ser considerado comum, pelo fato de o Zn ser o micronutriente que apresenta a menor disponibilidade nos solos brasileiros (Lopes; Guilherme, 2016).

Da mesma forma ao observado no presente estudo, a calagem não alterou os teores de Cu também em outros trabalhos com a calagem em superfície ou incorporada (Alleoni et al., 2005; Moreira et al., 2017; Soratto; Crusciol, 2008b); não teve efeito nos teores de Mn (Ernani; Nascimento; Oliveira, 1996; Moreira et al., 2024) e de Zn (Caires et al., 2009; Fonseca; Caires; Barth, 2010; Moreira et al., 2024). Inclusive, foram observados aumentos incomuns de Mn com a aplicação de calcário, que podem ser atribuídos à mineralização da MO (Florentino et al., 2021; Fonseca et al., 2010; Moreira et al., 2024). No caso do Mn, fatores como a forma e a temperatura de secagem, o tempo entre o preparo inicial e a análise, bem como a solução extratora e a proporção solo:solução podem levar a resultados diferentes para uma mesma amostra de solo (Fonseca; Caires; Barth, 2010; Miyazawa et al., 1996; Moreira et al., 2006, 2016). Fatores como o revolvimento do solo também podem intensificar a diminuição dos teores de Mn devido ao aumento da aeração do solo (Joris et al., 2016; Moreira et al., 2017). Além disso, as formas disponíveis também são alteradas pelo potencial redox, MO e a ação de bactérias oxidantes do gênero *Arthrobacter* (Malavolta et al., 2006).

#### **4.3 Concentrações de nutrientes nas folhas**

A calagem aumentou as concentrações de Ca e Mg nas folhas de da soja e milho (Tabela 4), que era esperado, devido aos aumentos nos teores do solo (Figura 4) e o calcário é a principal fonte desses nutrientes (Joris et al., 2013, 2016; Quaggio et al., 1998; Moreira et al., 2024; Shenfert et al., 2019). Apesar do aumento, as concentrações observadas para Ca e Mg ficaram abaixo dos valores considerados adequados para a cultura da soja, que são 10 e 4 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Martinez; Carvalho; Souza, 1999). Na cultura do milho, as concentrações de Mg foram incrementadas com a calagem para níveis adequados para a cultura (2,5-4,0 g kg<sup>-1</sup>) (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). Por sua vez, o Ca não apresentou alterações em função da calagem e foi superior à faixa recomendada, que é a mesma para o Mg na cultura (2,5-4,0 g kg<sup>-1</sup>).

As concentrações de N, P e K não foram afetadas pelas doses de calcário em ambas as culturas. No entanto, as médias de N e P nas folhas de soja, K no milho em 2021/22 foram inferiores à faixa recomendada para as culturas (Martinez; Carvalho; Souza, 1999; Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). Por sua vez, as concentrações de S nas folhas de milho na safra 2021/22

foram aumentadas com o aumento das doses de calcário e superiores aos níveis adequados para a cultura (1,5-2,0 g kg<sup>-1</sup>).

Embora não tenha sido observado o efeito da calagem sobre N, P e K nas folhas, a calagem pode afetar processos que alteram a disponibilidade desses elementos no solo. A elevação do pH favorece a atividade de microrganismos envolvidos na decomposição da MO. Dessa forma, a mineralização aumenta a liberação de nutrientes, com destaque para N e S, presentes em grande quantidade em resíduos orgânicos (Abdalla et al., 2022; Barrow; Hartemink, 2023; Costa et al., 2018; Holland et al., 2018). A correção de pH também melhora a assimilação de N pelas plantas através da simbiose, visto que ambientes com acidez elevada são prejudiciais às bactérias do gênero *Bradyrhizobium* responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio (Hungria; Vargas, 2000; Rice; Pinney; Nyborg, 1977). O alívio da acidez reduz a adsorção de P em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, diminui a precipitação de P com íons Fe<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, aumenta o volume de solo explorado pelas raízes e melhora a eficiência de fertilizantes fosfatados (Fageria; Baligar, 2008; Holland et al., 2018). A adubação potássica pode ter sua eficiência aumentada com a calagem, pela maior retenção de cátions com aumento de pH e maior volume de raízes no solo. Por outro lado, altos teores de Ca e Mg podem causar uma inibição competitiva sobre a absorção de K (Han et al., 2023).

Quanto aos micronutrientes na soja, não foram observadas diferenças nas concentrações de Cu e Zn nas folhas, mas B, Fe e Mn reduziram com o aumento das doses de calcário (TABELA 5). Apesar das reduções, as concentrações se mantiveram muito acima dos valores considerados adequados para soja B (20), Fe (50) e Mn (20 mg kg<sup>-1</sup>) (Martinez; Carvalho; Souza, 1999). As reduções observadas nas concentrações foliares de B e Fe refletiram a diminuição dos teores dos elementos no solo (Tabela 3) e isso também foi indicado nas correlações positivas entre teores no solo e concentração na planta, para B ( $\rho = 0,55^{**}$ ) e Fe ( $\rho = 0,62^{**}$ ) (Figuras 6). Para o Mn, no entanto, a redução na concentração foliar contrasta com a ausência de efeitos da calagem sobre o teor disponível no solo ( $\rho = -0,29$  NS). No entanto, é válido ressaltar que a amostragem de solo foi feita após a colheita e as condições no solo podem ter sido diferentes daquelas durante o florescimento da cultura, quando foi feita a amostragem de folhas. A concentração média de Cu na folha foi muito próxima do nível de referência de 10 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 5) e foi correlacionada com o teor no solo ( $\rho = 0,49^*$ ). Para o Zn não foi observado correlação significativa e a quantidade na folha esteve bem acima da concentração de 20 mg kg<sup>-1</sup>, considerada adequada para a cultura (Martinez; Carvalho; Souza, 1999).

Resultados semelhantes foram encontrados por Quaggio et al. (1998), em que a calagem incorporada reduziu os teores de B e Mn nas folhas de soja, na média de três cultivos, mas se

mantiveram dentro na faixa adequada para a cultura. No entanto, segundo os autores, as doses de calcário não afetaram a concentração de Fe. Em Moreira et al. (2024), a calagem reduziu as concentrações de B, Mn e Zn em dois locais cultivados com soja, Fe em apenas um dos locais e não foram observados efeitos para Cu. Porém, da mesma forma, as quantidades se mantiveram acima dos níveis adequados para a cultura. Em SPD, a aplicação de até 6 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície também reduziram os teores de Mn e Zn nas folhas de soja, mas continuaram acima do valor mínimo recomendado (Caires et al., 2001). Em todos esses trabalhos, assim como no presente estudo, a produtividade foi aumentada com a elevação do pH e V%. Dessa forma, desde que as concentrações dos nutrientes nas folhas estejam dentro da faixa recomendada para a cultura, não devem ser esperados prejuízos na produtividade com a elevação do pH.

Embora as concentrações foliares de Fe no milho (safra 2021/22) tenham sido reduzidas pelas doses de calcário aplicadas (Tabela 5), as quantidades médias se mantiveram dentro da faixa adequada (50-250 mg kg<sup>-1</sup>). As concentrações de B no tecido foliar foram inferiores à faixa recomendada (15-20 mg kg<sup>-1</sup>), o que era esperado, devido aos teores de B no solo (TABELA 4). Por sua vez, as concentrações de Cu e Zn nas folhas de milho ficaram dentro da faixa adequada para Cu (6-20 mg kg<sup>-1</sup>) e Zn (15-50 mg kg<sup>-1</sup>). Como já observado em outros estudos, as concentrações foliares de B (Rodrighero; Barth; Caires, 2015); Cu (Joris et al., 2013; Miranda; Miranda, 2000; Rodrighero; Barth; Caires, 2015; Tissi; Caires; pauletti, 2004) e Zn (Tissi; Caires; Pauletti, 2004) na cultura do milho não foram modificadas pela calagem, embora os valores de pH do solo tenham sido elevados pela calagem (Figura 4). De forma geral, se observou a ausência de efeitos da calagem sobre os teores de micronutrientes no solo (Tabela 4), os quais foram confirmados pelas correlações não significativas entre os teores no solo e na planta. Este fato também indica que os extratores de micronutriente no solo não estão sendo eficientes em avaliar a disponibilidade de nutrientes às plantas, conforme discutido por Moreira et al. (2024).

#### ***4.4 Caracteres agronômicos e produtividade***

A produtividade e a altura de plantas da soja foram positivamente influenciadas pelas doses de calcário aplicadas (Figura 5a e Apêndice B). Esta resposta positiva pode ser atribuída à melhoria dos atributos químicos provocados pela calagem (Figura 4), como já discutido na literatura (Fageria, 2008; Fageria et al., 2013; Quaggio et al., 1998; Moraes et al., 2023; Wang et al., 2021). O Ca é um dos principais elementos associados ao desenvolvimento radicular,

atuando como componente estrutural da parede celular, que confere integridade de membranas celulares e a preservação do conteúdo citoplasmático nas zonas de multiplicação e expansão celular (Floss, 2011). Como é imóvel no floema, o nutriente deve estar disponível ao longo do perfil de solo para garantir a adequada formação dos tecidos em desenvolvimento em maiores profundidades. Assim, a calagem incorporada profundamente, com aportes de Ca e Mg pelo corretivo, aumento de pH e ausência de toxicidade de alumínio proporciona condições quimicamente favoráveis ao crescimento de raízes (Leite et al., 2006; Bortoluzzi et al., 2014; Costa et al., 2018), mitigando os efeitos do déficit hídrico.

A exigência hídrica da cultura da soja com alto potencial de produtividade é de aproximadamente 800 mm de água ao longo do ciclo e a fase crítica, isto é, o período de maior demanda ocorre entre o início do florescimento e o enchimento de grãos (Rosolem, 2005; Tagliapietra et al., 2022). A precipitação total acumulada no cultivo da soja foi superior ao valor de referência citado, porém, houve um período de estiagem entre o pré-florescimento e o início da formação de vagens (Figura 3a). Nessa condição, as plantas das parcelas que receberam calcário provavelmente tiveram maior crescimento de raízes em profundidade (Joris et al., 2013; Moraes et al. 2013), mantendo a absorção de água e nutrientes mesmo durante a ausência de chuvas, o que impactou o desenvolvimento das plantas e a produtividade. Nesse sentido, além da recomendação de doses adequadas de calcário, a incorporação profunda (0-40 cm) do corretivo é uma estratégia importante para aumentar a resiliência das culturas, pois aumentando os nutrientes no perfil de solo, haverá maior crescimento de raízes, aumentando, conseqüentemente, a disponibilidade de água às plantas (Moraes et al., 2023).

Como apontaram as correlações, a produtividade da soja foi positivamente relacionada com o aumento de pH e apresentou correlações negativas com B, Cu e Fe no solo e B, Fe e Mn na folha (Figura 6). A correlação negativa indica que a produtividade aumentou com a redução dos teores ou concentrações desses elementos, porém, isso não faz sentido do ponto de vista agrônomo, já que as condições no solo não representavam risco potencial de fitotoxicidade (Davis, 1996; Fageria, 2000; Rosolem et al., 1992). Dessa forma, a explicação mais provável é que havia outros fatores que no momento eram mais limitantes à produtividade, como indicou a relação positiva com pH, mas podem também ser adicionados os aumentos de Ca ( $\rho = 0,65^{**}$ ), Mg ( $\rho = 0,61^{**}$ ) e V% ( $\rho = 0,64^{**}$ ).

A ausência de respostas do milho à calagem nas duas safras pode também ser associada ao regime de chuvas, visto que não foram observadas correlações significativas entre as produtividades e os atributos de solo e os teores de micronutrientes nas folhas. Para a cultura, a demanda hídrica varia entre 400 e 600 mm, sendo crítico o período entre 15 dias antes a 15

dias após a emissão da inflorescência masculina (Fancelli, 2017). Em ambas as safras de milho, a precipitação acumulada foi muito superior às necessidades da cultura e não ocorreram limitações durante o florescimento (FIGURAS 3b e 3c).

O crescimento de raízes no milho geralmente se estende até o estágio R3 – durante o enchimento de grãos (Magalhães et al., 2002), no entanto, o maior investimento em sistema radicular pela planta ocorre até os estádios vegetativos V6-V7 - seis e sete folhas totalmente expandidas (Floss, 2012; Fancelli, 2013). Sob condições favoráveis de umidade, há uma menor produção de raízes em profundidade, com maior concentração em superfície, consequentemente, as plantas se tornam mais suscetíveis a uma eventual recessão no suprimento hídrico (Caires et al., 2008a). Isso foi provavelmente o que aconteceu na safra 2021/22, em que a ausência de chuvas durante o enchimento de grãos (Figura 3b) reduziu drasticamente a produtividade geral de todos os tratamentos. Apesar de ter havido aumento do PMG (peso de mil grãos) com aumento das doses de calcário (Apêndice B), não foram observadas diferenças nas produtividades entre os tratamentos (Figura 5b). Na safra 2022/23, com chuvas ao longo de todo o ciclo, as produtividades foram superiores às da safra 2021/22, mas sem efeitos dos tratamentos (Figura 5c). As produtividades médias foram 7.150 kg ha<sup>-1</sup> (2021/22) e 9.309,0 kg ha<sup>-1</sup> (2022/23), consideradas baixas para o cultivo de milho verão na região (Moreira et al., 2023). Quando há boa disponibilidade hídrica ao longo de todo o ciclo, as culturas tendem a apresentar uma menor resposta ao manejo da acidez do solo (Caires et al., 2008a, 2008b), o que justifica os resultados encontrados no presente estudo (Figura 5). No entanto, como a cultura do milho vem sendo amplamente cultivada na safra de inverno, onde a água é o principal fator limitante, aumentos de produtividade têm sido associados ao uso de maiores doses de calcário incorporadas, as quais provocam maior desenvolvimento de raízes em profundidade (Moraes et al., 2023).

A resposta das culturas ao manejo da fertilidade do solo depende das condições climáticas e da sensibilidade do genótipo cultivado, portanto, os resultados costumam ser variáveis entre os anos de avaliação (Caires; Barth; Garbui, 2006; Costa; Rosolem, 2007; Caires et al., 2008a, 2008b; Enesi et al., 2023). Por essa razão, trabalhos dessa natureza são conduzidos sob diferentes regimes climáticos, tipos de solos, sistemas de manejo e culturas, para que as condições dos testes sejam representativas das situações a campo e para que as conclusões possam ser extrapoladas para diversos ambientes de produção. Assim, avaliações a longo prazo são também importantes para evitar conclusões equivocadas a partir das observações de poucos cultivos (Caires et al., 2015; Caires; Joris; Churka, 2010; Fageria, 2001). Até o momento, nossos resultados indicam que o investimento em correção do subsolo com

doses suficientes para melhorar os atributos químicos do perfil é uma estratégia eficiente para garantir boas produtividades e tornar as plantas mais resilientes às intempéries climáticas. Adicionalmente, a adoção de doses elevadas de calcário não causou desequilíbrios nutricionais entre os macronutrientes, tampouco provocou deficiências visuais de micronutrientes nas culturas estudadas.

## 5. CONCLUSÃO

A incorporação profunda de calcário aumenta o pH do solo, os teores de Ca e Mg e a V% no perfil de 0-40 cm.

Em geral, a calagem teve pouco efeito sobre a disponibilidade de micronutrientes no solo e, quando houveram reduções, as mudanças tiveram pouco efeito agrônômico.

A calagem aumentou os teores foliares de Ca na soja e Mg na soja e no milho.

Reduções em micronutrientes na folha induzidas pela calagem não afetam a produtividade, desde que as concentrações se mantenham em níveis adequados para as culturas.

A calagem aumentou a produtividade da soja pela melhoria do ambiente químico do solo, promovendo melhor desempenho da lavoura mesmo sob condições de limitação hídrica.

Na cultura do milho, em duas safras, não foram observadas diferenças entre as doses testadas.

A ausência de respostas esteve associada à ocorrência regular de chuvas ao longo do ciclo da cultura e, também, à baixa produtividade geral do milho durante os dois anos de avaliação.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M. et al. Does liming grasslands increase biomass productivity without causing detrimental impacts on net greenhouse gas emissions? **Environmental Pollution**, v. 300, p. 118999, 2022.
- ABREU, C. A. de; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. dos. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 11, p. 645-736.
- AGUIAR, V. F. et al. Comparison between limestone and silicate corrective associated gypsum in the growth of a forage grass. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 52, n. 13, p. 1484–1492, 2021.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 29, n. 6, p. 923–934, 2005.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVAREZ V., V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes Em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, cap. 5, p. 25–32.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 28, n. 1, p. 115–123, 2004.
- AULER, André C. et al. Efeitos da calagem em sistema plantio direto em Inceptissolos do Sul do Brasil. **Geoderma Regional**, v. e00206, 2019.
- AZAM, G.; GAZEY, C. Slow movement of alkali from surface-applied lime warrants the introduction of strategic tillage for rapid amelioration of subsurface acidity in south-western Australia. **Soil research**, v. 59, n. 1, p. 97, 2021.
- BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e incorporada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 3, p. 507–514, 2005.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1317-1324, 2000.
- 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.
- BELLINASSO, R. J. S. et al. Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. **Soil research**, v. 60, n. 1, p. 33–49, 2021.

- BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014.
- BOSSOLANI, J. W. et al. Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics. **Agronomy for sustainable development**, v. 42, n. 2, 2022.
- BOYKO, R. et al. A comparison of soil liming requirement methodologies in temperate, Northern European pedo-climates. **Journal of plant nutrition and soil science**, v. 186, n. 5, p. 543–553, 2023.
- CAIRES, E. F. et al. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 25, n. 4, p. 1029–1040, 2001.
- CAIRES, E. F. et al. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 57–64, 2008a.
- CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil use and management**, v. 24, n. 3, p. 302–309, 2008b.
- CAIRES, E. F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 66, p. 41–53, 2015.
- CAIRES, E. F. et al. Surface liming and zinc availability in a long-term experiment under no-till system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 40, n. 17–18, p. 2898–2911, 2009.
- CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil & tillage research**, v. 89, n. 1, p. 3–12, 2006.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil: Liming and gypsum in no-till farming. **Soil use and management**, v. 27, n. 1, p. 45–53, 2011.
- CAMARGO, A. P. de et al. Efeito da calagem nas produções de cinco cultivos de milho, seguidos de algodão e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 7, p. 1007-1012, 1982.
- CHAVES, J. C. D.; PAVAN, M. A.; IGUE, K. Respostas do cafeeiro à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 5, p. 573-582, 1984.
- COSTA, A.; ROSOLEM, C. A. Liming in the transition to no-till under a wheat–soybean rotation. **Soil & tillage research**, v. 97, n. 2, p. 207–217, 2007.

- COSTA, C. H. M. da et al. Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management. **Crop & pasture science**, v. 69, n. 5, p. 488, 2018.
- CRESPO-MENDES, N.; LAURENT, A.; HAUSCHILD, M. Z. Effect factors of terrestrial acidification in Brazil for use in Life Cycle Impact Assessment. **The international journal of life cycle assessment**, v. 24, n. 6, p. 1105–1117, 2019.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. **Nutrient cycling in agroecosystems**, v. 115, n. 3, p. 347–372, 2019.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Nitrate role in basic cation leaching under no-till. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 35, n. 6, p. 1975–1984, 2011.
- CUNNINGHAM, C. Characterization of dry spells in Southeastern Brazil during the monsoon season. **International journal of climatology: a journal of the Royal Meteorological Society**, v. 40, n. 10, p. 4609–4621, 2020.
- DAVIS, J. G. Soil pH and magnesium effects on manganese toxicity in peanuts. **Journal of plant nutrition**, v. 19, n. 3–4, p. 535–550, 1996.
- DEUS, A. C. F. et al. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil & tillage research**, v. 196, n. 104422, p. 104422, 2020.
- ENESI, R. O. et al. Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability - a meta-analysis. **Frontiers in agronomy**, v. 5, 2023.
- ERNANI, P. R.; BAYER, C.; MAESTRI, L. Corn yield as affected by liming and tillage system on an acid Brazilian oxisol. **Agronomy journal**, v. 94, n. 2, p. 305–309, 2002.
- FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 11, p. 1419–1424, 2001.
- FAGERIA, N. K. et al. Optimal acidity indices for soybean production in Brazilian oxisols. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 44, n. 20, p. 2941–2951, 2013.
- FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 4, n. 1, p. 57–62, 2000.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Chapter 7 ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2008. p. 345–399.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in Crop Production. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2002. p. 185–268.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; ZOBEL, R. W. Yield, nutrient uptake, and soil chemical properties as influenced by liming and boron application in common bean in a no-tillage system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 38, n. 11–12, p. 1637–1653, 2007.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; MOREIRA, A. Yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties as influenced by liming and iron application in common bean in a no-tillage system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 41, n. 14, p. 1740–1749, 2010.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of south American soils for sustainable crop production. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 221–275.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 73–78, 2004.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. Liming and manganese influence on common bean yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties of an oxisol under no-tillage system. **Journal of plant nutrition**, v. 31, n. 10, p. 1723–1735, 2008.

FANCELLI, A. L. Ecofisiologia, fenologia e implicações básicas de manejo. In: GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. (Ed.). **Milho do plantio à colheita**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2017, cap. 3, p. 49-75.

FANCELLI, A. L. Manejo fisiológico e nutricional da cultura do milho para alta produtividade. In: FANCELLI, A. L. (Ed.). **Milho estratégias de manejo**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2013, cap. 3, p. 27-54.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration: I. a comparison of several mechanical procedures. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 52, n. 1, p. 169–175, 1988.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, Cooperative Extension Service. 1977. 11 p. (Special Report, 80).

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Dinâmica da calagem superficial em um latossolo vermelho distrófico. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 29, n. 2, p. 235–247, 2005.

FLORENTINO, A. L. et al. Nutritional status of Eucalyptus plantation and chemical attributes of a Ferralsol amended with lime and copper plus zinc. **Forest ecology and management**, v. 502, n. 119742, p. 119742, 2021.

FLOSS, E. L. Ecofisiologia e manejo de milho para altos rendimentos. In: **Revista Plantio Direto**. Jun/julho, 2012, p. 18-22.

FLOSS, E. L. Nutrientes e desenvolvimento das culturas. In: FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o que está por trás do que se vê**. 5. ed., Passo Fundo: UPF Editora, 2011, cap. 12, p. 495-677.

- FONSECA, A. F. DA; CAIRES, E. F.; BARTH, G. Extraction methods and availability of micronutrients for wheat under a no-till system with a surface application of lime. **Scientia agricola**, v. 67, n. 1, p. 60–70, 2010.
- FRANCHINI, J. C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2267–2276, 1999.
- FRANCHINI, J. C. et al. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant and Soil**, v. 231, p. 55-63, 2001.
- GOLDBERG, S. et al. Prediction of boron adsorption by field samples of diverse textures. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 69, n. 5, p. 1379–1388, 2005.
- GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. Em: **Boron in Soils and Plants: Reviews**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. p. 35–48.
- GONZALEZ-ERICO, E. et al. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of central Brazil. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 43, n. 6, p. 1155–1158, 1979.
- GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil use and management**, v. 32, n. 3, p. 390–399, 2016.
- HABY, V. A.; LEONARD, A. T. Limestone quality and effectiveness for neutralizing soil acidity. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 33, n. 15–18, p. 2935–2948, 2002.
- HAMMEL, J. E.; SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H. Effect of physical and chemical profile modification on soybean and corn production. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 49, n. 6, p. 1508–1511, 1985.
- HAN, T. et al. Soil potassium regulation by initial K level and acidification degree when subjected to liming: A meta-analysis and long-term field experiment. **Catena**, v. 232, n. 107408, p. 107408, 2023.
- HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. **Plant and soil**, v. 486, n. 1–2, p. 209–215, 2023.
- HAYES, R. C. et al. Lime increases productivity and the capacity of lucerne (*Medicago sativa* L.) and phalaris (*Phalaris aquatica* L.) to utilise stored soil water on an acidic soil in south-eastern Australia. **Plant and soil**, v. 400, n. 1–2, p. 29–43, 2016.
- HEINRICH, A.; SULLIVAN, D.; MOORE, A. D. Indicators of lime reactivity in soil: particle size, carbon dioxide evolution, and citric acid titration. **Archiv fur Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde**, v. 68, n. 6, p. 732–748, 2022.

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

HOODA, P. S. **Trace elements in soils**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2010.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N<sub>2</sub> fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field crops research**, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas (1991/2020)**. Brasília - DF, 2024.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424, 2013.

JORIS, H. A. W. et al. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil & tillage research**, v. 162, p. 68–77, 2016.

KABATA-PENDIAS, A.I. **Trace elements in soils**. 3rd ed., CRC Press, 2000.

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005.

LEITE, G. H. M. N. et al. Atributos químicos e perfil de enraizamento de milho influenciados pela calagem em semeadura direta. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 30, n. 4, p. 685–693, 2006.

LI, Y. et al. 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.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibrium in soils**. John Wiley & Sons, New York, 1979.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 1–72.

MAGALHÃES, P. C. Fisiologia do milho. **Circular Técnica**. n. 22, Sete Lagoas: Embrapa, 2002, 23 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 637p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G. de; SOUZA, R. B. de. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes Em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, cap. 17, p. 143–168.

MELLO, J. C. A. et al. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 27, n. 3, p. 553–561, 2003.

MINATO, E. A. et al. Lime and gypsum application to low-acidity soils: Changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. **Soil & tillage research**, v. 234, n. 105860, p. 105860, 2023.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Glei Pouco Húmico. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 24, n. 1, p. 209–215, 2000.

MIYAZAWA, M. et al. Manganese dynamic in acid soil and uptake by maize seedlings. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 27, n. 9–10, p. 2349–2359, 1996.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 45, n. 3, p. 251–256, 2002.

MORAES, F. A. de et al. Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 144, n. 126763, p. 126763, 2023.

MOREIRA, S. G. et al. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 25, n. 1, p. 71–81, 2001.

MOREIRA, S. G. et al. Chemical forms in soil and availability of manganese and zinc to soybean in soil under different tillage systems. **Soil & tillage research**, v. 163, p. 41–53, 2016.

MOREIRA, S. G. et al. Circular agriculture increases food production and can reduce N fertilizer use of commercial farms for tropical environments. **The Science of the total environment**, v. 879, n. 163031, p. 163031, 2023.

MOREIRA, S. G. et al. Deep incorporation of high limestones rates affects the macro and micronutrients availability and the accumulated grain yield in three acidic sites in Brazil. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 154, n. 127074, p. 127074, 2024.

MOREIRA, S. G. et al. Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 89, 2017.

MOREIRA, S. G. et al. Formas químicas, disponibilidade de manganês e produtividade de soja em solos sob semeadura direta. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 30, n. 1, p. 121–136, 2006.

NETO, P. H.W. et al. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciencia rural**, v. 30, n. 2, p. 257–261, 2000.

NUNES, M. R. et al. Lime movement through highly weathered soil profiles. **Environmental research communications**, v. 1, n. 11, p. 115002, 2019.

OLEGO, M. A. et al. Effects of overliming on the nutritional status of grapevines with special reference to micronutrient content. **OENO One**, v. 55, n. 2, p. 57–73, 2021.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & tillage research**, v. 38, n. 1–2, p. 47–57, 1996.

PANDOLFO, C. M.; TEDESCO, M. J. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 10, p. 753-758, 1996.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 38, n. 2, p. 495–505, 2014.

PRADO, R. DE M. Efeito residual do calcário sob diferentes modos de incorporação antes da instalação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 7, n. 3, p. 478–482, 2003.

QUAGGIO, J. A. et al. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 3, p. 375-383, 1993.

QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Agronomic efficiency of limestones with different acid-neutralizing capacity, under field condition. Em: **Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. p. 491–496.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria, 2022.

RAIJ, B. V. et al. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 22, n. 1, p. 101–108, 1998.

RAIJ, B. V. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações agronômicas**. n. 135, International Plant Nutrition Institute, 2011, p. 8-18.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 24, n. 4, p. 797–805, 2000.

RICE, W. A.; PENNEY, D. C.; NYBORG, M. Effects of soil acidity on rhizobia numbers, nodulation and nitrogen fixation by alfalfa and red clover. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 57, n. 2, p. 197-203, 1977.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. Iowa State Univ. **Coop. Ext. Serv. Spec. Rep.**, v. 48, p. 21, 1993.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 39, n. 6, p. 1723–1736, 2015.

ROSOLEM, C. A. Água na cultura da soja. In: **Boletim de Pesquisa de Soja 2005**. n. 9, Rondonópolis: Fundação MT, 2005, p. 95-102.

ROSOLEM, C. A. et al. Manganês no solo, sua avaliação e toxidez de manganês em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 277-285, 1992.

ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 42, n. 10, p. 1473–1478, 2007.

SANTOS, D. R. dos et al. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil & tillage research**, v. 180, p. 222–231, 2018.

SANTOS, H. G. dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Embrapa Solos. Brasília, DF, 2018.

SCHENFERT, T. A. et al. 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.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária, 1999. p. 370.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**, 12th Edn Washington. DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, 2014.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 32, n. 2, p. 675–688, 2008b.

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 ciencia do solo**, v. 32, n. 2, p. 663–673, 2008a.

SOUZA, D. M. de; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUZA, D. M. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, cap. 3, p. 81-96.

SOUZA, D. M. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVERIA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 5, p. 205-274.

TAGLIAPIETRA, E. L. Exigências climáticas da soja. In: TAGLIAPIETRA, E. L. et al. (Ed.). **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. 2. ed. Santa Maria: [s. n.], 2022, cap. 2, p. 167-238.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revisada e ampliada, Brasília: Embrapa, 2017, 574 p.

TIECHER, T. et al. Base saturation is an inadequate term for Soil Science. **Revista brasileira de ciencia do solo**, v. 46, 2022.

TISSI, J. A.; CAIRES, E. F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semedura direta de milho. **Bragantia: boletim tecnico do Instituto Agronomico do Estado de Sao Paulo**, v. 63, n. 3, p. 405–413, 2004.

VARGAS, J. P. R. de et al. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil & tillage research**, v. 185, p. 47–60, 2019.

VON UEXKÜLL, H. R; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, 171, 1-15, 1995.

WANG, Y. et al. 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.

WARFVINGE, P.; SVERDRUP, H. Modeling limestone dissolution in soils. **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 53, n. 1, p. 44–51, 1989.

## APÊNDICE A – modelos estatísticos para ph, ca, mg e v% entre 2020 e 2023 nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm.

(Continua)

Atributo	Ano	Profundidade (cm)	Figura	Equação	R <sup>2</sup>	Significância
pH	2020	0-20	Figura 4a	$\hat{y} = -0090x^2 + 0.2790x + 5.2955$	0.9844	***
		20-40	Figura 4a	$\hat{y} = 0.0272x + 5.2655$	0.7128	**
	2021	0-20	Figura 4b	$\hat{y} = -0.0071x^2 + 0.2351x + 5.2729$	0.9795	***
		20-40	Figura 4b	$\hat{y} = 0.0364x + 5.2496$	0.8416	***
	2022	0-20	Figura 4c	$\hat{y} = -0.0089x^2 + 0.2698x + 5.2390$	0.9638	***
		20-40	Figura 4c	$\hat{y} = -0.0037x^2 + 0.1224x + 5.2205$	0.9811	*
	2023	0-20	Figura 4d	$\hat{y} = -0.0119x^2 + 0.3052x + 5.1941$	0.9773	***
		20-40	Figura 4d	$\hat{y} = 0.0316x + 5.6186$	0.6764	***
Ca	2020	0-20	Figura 4e	$\hat{y} = -0.0182x^2 + 0.5815x + 0.7250$	0.9778	***
		20-40	Figura 4e	$\hat{y} = 0.0464x + 0.5246$	0.8260	***
	2021	0-20	Figura 4f	$\hat{y} = 0.0090x^2 + 0.3101x + 1.5000$	0.9938	**
		20-40	Figura 4f	$\hat{y} = 0.0531x + 0.6079$	0.9318	***
	2022	0-20	Figura 4g	$\hat{y} = -0.0144x^2 + 0.3882x + 1.6577$	0.9713	***
		20-40	Figura 4g	$\hat{y} = 0.0621x + 1.1278$	0.7109	**
	2023	0-20	Figura 4h	$\hat{y} = -0.0184x^2 + 0.4804x + 1.6441$	0.9346	**
		20-40	Figura 4h	$\hat{y} = \bar{y} \text{ obs} =$		
2020	0-20	Figura 4i	$\hat{y} = -0.0156x^2 + 0.4276x + 0.4967$	0.9507	***	
	20-40	Figura 4i	$\hat{y} = 0.0346x + 0.3861$	0.8147	***	

APÊNDICE A – modelos estatísticos para ph, ca, mg e v% entre 2020 e 2023 nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm.

						(Conclusão)
Atributo	Ano	Profundidade (cm)	Figura	Equação	R <sup>2</sup>	Significância
Mg	2021	0-20	Figura 4j	$\hat{y} = -0.0108x^2 + 0.2934x + 0.5292$	0.9797	***
		20-40	Figura 4j	$\hat{y} = -0.0030x^2 + 0.1033x + 0.1274$	0.9819	**
	2022	0-20	Figura 4k	$\hat{y} = -0.0102x^2 + 0.2789x + 0.3658$	0.9599	***
		20-40	Figura 4k	$\hat{y} = -0.0061x^2 + 0.1754x + 0.2021$	0.9903	**
	2023	0-20	Figura 4l	$\hat{y} = -0.0134x^2 + 0.3263x + 0.4277$	0.9692	***
		20-40	Figura 4l	$\hat{y} = -0.0038x^2 + 0.1140x + 0.3601$	0.7742	**
V%	2020	0-20	Figura 4m	$\hat{y} = -0.3310x^2 + 9.4007x + 25.1240$	0.9186	***
		20-40	Figura 4m	$\hat{y} = 1.3221x + 19.5660$	0.8214	***
	2021	0-20	Figura 4n	$\hat{y} = -0.2407x^2 + 7.0088x + 35.9817$	0.9689	***
		20-40	Figura 4n	$\hat{y} = -0.0910x^2 + 3.3444x + 18.6113$	0.9691	*
	2022	0-20	Figura 4o	$\hat{y} = -0.2306x^2 + 6.4509x + 38.5620$	0.8454	***
		20-40	Figura 4o	$\hat{y} = -0.1478x^2 + 4.4503x + 26.0378$	0.9516	**
	2023	0-20	Figura 4p	$\hat{y} = -0.2715x^2 + 7.8406x + 29.7915$	0.8922	***
		20-40	Figura 4p	$\hat{y} = -0.1112x^2 + 3.1986x + 23.1988$	0.8470	*

Significância do teste de F para o modelo: NS (não significativo)  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

Fonte: Do autor (2024)

APÊNDICE B – Altura de plantas e peso de mil grãos (pmg) em função das doses de calcário.

dose	Soja 2020/21		milho 2021/22		milho 2022/23	
	altura	PMG	altura	PMG	altura	PMG
Mg ha <sup>-1</sup>	cm	g	cm	g	cm	g
0	73,5	150,6	245,0	380,0	256,3	356,5
4	93,2	149,9	247,5	405,4	272,9	343,8
8	96,0	150,2	249,8	385,9	270,0	341,0
12	96,7	150,4	247,5	408,8	272,6	343,4
16	97,1	150,8	245,0	421,4	274,0	345,3
20	95,2	150,7	239,3	409,4	271,1	348,7
CV (%)	7,5	2,0	5,6	4,1	4,2	3,5
Efeito	Y = -0,1314x <sup>2</sup> + 3,4905x + 76,2766		NS	NS	Y = 1,5565x <sup>2</sup> + 386,2627	
R <sup>2</sup>	0,89	-	-	0,55	-	-

Significância do teste de F para o modelo: NS (*não significativo*)  $P > 0,05$ ; \* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ .

Fonte: Do autor (2024)