



**JUNIOR CÉZAR RESENDE SILVA**

**CORREÇÃO DA ACIDEZ NO PERFIL DO SOLO PARA  
IMPLANTAÇÃO DE CULTURAS ANUAIS**

**LAVRAS - MG  
2021**

**JUNIOR CÉZAR RESENDE SILVA**

**CORREÇÃO DA ACIDEZ NO PERFIL DO SOLO PARA IMPLANTAÇÃO DE  
CULTURAS ANUAIS**

Dissertação 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. Dra. Francielle Roberta Dias de Lima  
Coorientadora

**LAVRAS - MG  
2021**

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

Silva, Junior César Resende.

Correção da acidez no perfil do solo para implantação de  
culturas anuais / Junior César Resende Silva. - 2021.

76 p.

Orientador(a): Silvino Guimarães Moreira.

Coorientador(a): Francielle Roberta Dias de Lima.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Fertilidade do solo. 2. Solos ácidos. 3. Calcário. I. Moreira,  
Silvino Guimarães. II. Lima, Francielle Roberta Dias de. III. Título.

**JUNIOR CÉZAR RESENDE SILVA**

**CORREÇÃO DA ACIDEZ NO PERFIL DO SOLO PARA IMPLANTAÇÃO DE  
CULTURAS ANUAIS**

**ACIDITY CORRECTION OF SOIL PROFILE FOR IMPLEMENTATION OF  
ANNUAL CROPS**

Dissertação 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 22 de dezembro de 2021.

Dr. Francisco Hélcio Canuto Amaral      Rehagro Pesquisa

Dr. Fábio Aurélio Dias Martins      EPAMIG

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira  
Orientador

Prof. Dra. Francielle Roberta Dias de Lima  
Coorientadora

**LAVRAS - MG  
2021**

*Aos meus pais, Mário e Jânia, por todo o apoio, paciência, carinho e incentivo, que possibilitaram essa conquista.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por ter me dado força e coragem durante toda esta caminhada.

Ao Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira, por toda a amizade, confiança, incentivo, paciência, conselhos e apoio, que me auxiliaram a concluir esta etapa.

À Prof. Francielle Roberta Dias de Lima, por toda a orientação e auxílio na redação deste trabalho.

À minha família, por todo o amor e apoio necessário para chegar a esse momento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudo, apoio essencial para viabilizar esta pesquisa.

À Associação dos Mineradores de Pains, Arcos e Região (AMPAR), pelo apoio financeiro, de fundamental importância para a execução dos experimentos.

À Equipe do Laboratório de Análises Agropecuárias (3RLAB), pela parceria na realização das análises dos experimentos.

A todos do *Grupo* de Pesquisa em Manejo de Produção (GMAP), por todas as amizades e bons momentos, troca de conhecimentos, e pelo auxílio na condução dos experimentos.

Ao Setor de Grandes Culturas do Departamento de Agricultura (DAG), por disponibilizar toda a estrutura de recursos humanos e materiais, que possibilitaram a realização deste trabalho, em especial toda a ajuda do Antônio, Ezequiel, Edésio e Arnald.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia da UFLA, por todo o suporte prestado pelos docentes e pela secretaria.

Aos responsáveis e colaboradores das fazendas parceiras, que possibilitaram a instalação e a condução dos experimentos, Laerte e Alex (Fazenda Babilônia) e Marcos, Antônio Henrique e Célio (Fazenda Fundão).

Aos meus amigos, Flávio, Devison, Alessando, Hugo, Vitor Hugo (Andorinha), Antônio, Júlia, Inara, Mathusalém, Otávio, Thayná, Viviane, Josias e Mateus Barbosa, por todos os momentos compartilhados, com total auxílio e incentivo no período deste trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) ou Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

Muito obrigado!

## RESUMO

Nos últimos 10 anos, cerca de 1,5 milhão de hectares de novas áreas têm sido incorporadas por ano aos sistemas de produção de grãos no Brasil. A maior parte dessas áreas apresenta alguma forma de degradação de solo, principalmente relacionada a baixos teores de nutrientes e elevada acidez. Desta forma, a transformação dessas áreas em ambientes de alta produtividade passa inicialmente pela correção da acidez do solo e adequação dos teores de Ca e Mg. No entanto, ainda há dúvidas sobre as metodologias para recomendação de calcário no Brasil, pois em muitas situações as doses de calcário recomendadas pelas metodologias oficiais não têm sido suficientes para adequada correção do solo, levando técnicos e produtores a utilizarem doses de corretivo muito acima das recomendadas, baseadas em experiências locais, mas sem comprovação pela pesquisa. Desse modo, objetivou-se com esse estudo, avaliar a eficiência de doses crescentes de calcário na correção da acidez do solo, disponibilidade de cátions básicos e produtividade das culturas de soja e sorgo. O trabalho foi conduzido em duas áreas experimentais localizadas na região do Triângulo Mineiro, sob um Latossolo Vermelho Amarelo franco-arenoso e Latossolo Vermelho argiloso. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em seis doses de calcário (0, 4, 8, 12, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporadas com grade de 32 polegadas, com o objetivo de alcançar a camada de 0,0-0,40 m de profundidade. Realizou-se também um experimento em casa de vegetação, incubando-se por 90 dias, de maneira proporcional, as mesmas doses utilizadas no campo, misturadas a um volume de 2 dm<sup>-3</sup> de solo coletado na camada de 0,0-0,40 m. Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando houve diferença entre as doses de calcário, a análise de regressão foi testada. De forma geral, foi possível observar que a calagem promoveu o aumento dos valores de pH e V% e dos teores de Ca e Mg e reduziu os teores de H<sup>+</sup>Al nos experimentos de campo e de incubação. Também de forma geral, as concentrações de Cu, Fe, Mn, Zn e Fe nas folhas de soja reduziram com a utilização das maiores doses de calcário, mas permaneceram geralmente próximas ou acima do nível crítico. As produtividades apresentaram incrementos com as doses de calcário, alcançando o máximo rendimento com doses próximas a 6,5 Mg ha<sup>-1</sup> e 20 Mg ha<sup>-1</sup> no Local1, com solo franco-arenoso e no Local2, com solo argiloso, respectivamente.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Solos ácidos. Calcário. Saturação por bases. Culturas anuais.

## ABSTRACT

In the last 10 years, around 1.5 million hectares of new areas have been incorporated into grain production systems in Brazil each year. Most of these areas show some form of soil degradation, mainly related to low nutrient content and high acidity. Thus, the transformation of these areas into high productivity environments initially involves correction of soil acidity and adequacy of Ca and Mg contents. However, there are still questions about the methodologies used for limestone recommendation in Brazil, as in many situations the doses recommended by official methodologies have not been sufficient for adequate soil correction, leading technicians and producers to use corrective doses far above the recommended, based on local experience but not proven by research. Therefore, the objective of this study was to evaluate the efficiency of increasing doses of limestone in correcting soil acidity, availability of basic cations and productivity of soybean and sorghum crops. The work was carried out in two experimental areas located in the Triangulo Mineiro region, under a sandy-loamy Red Latosol and a clayey Red Latosol. The experimental design used was a randomized block design, with four replications. The treatments consisted of six doses of limestone (0, 4, 8, 12, 16 and 20 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporated with a 32-inch grid, with the objective of reaching a layer of 0,0-0,40 m of depth. Another experiment was carried out in a greenhouse, incubating for 90 days, proportionally, the same doses used in the field, mixed with a volume of 2 dm<sup>-3</sup> of soil collected from the 0,0-0,40 m layer. The results were submitted to analysis of variance and when there was a difference between limestone doses, the regression analysis was tested. In general, it was possible to observe that liming promoted an increase in pH and V% values and in Ca and Mg contents, and also reduced H+Al contents in field and incubation experiments. The concentrations of Cu, Fe, Mn, Zn and Fe in soybean leaves reduced with the use of the highest doses of limestone, remaining generally close to or above the critical level. Yields increased, reaching the maximum yield with doses close to 6.5 Mg ha<sup>-1</sup> and 20 Mg ha<sup>-1</sup> in Site1, with sandy loam soil and in Site2, with clayey soil, respectively.

Keywords: Soil fertility. Acidic soils. Limestone. Base saturation. Annual crops.

## SUMÁRIO

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>PRIMEIRA PARTE</b> |   |
| <b>1</b>              | <b>INTRODUÇÃO..... 11</b>   |
| <b>2</b>              | <b>REFERENCIAL TEÓRICO ..... 13</b>   |
| <b>2.1</b>            | <b>Acidez do solo ..... 13</b>  |
| <b>2.2</b>            | <b>Métodos de recomendação de calagem ..... 14</b>  |
| <b>2.3</b>            | <b>Calagem e disponibilidade de nutrientes ..... 17</b>   |
| <b>2.4</b>            | <b>Calagem para construção da fertilidade do perfil do solo ..... 19</b>  |
|                       | <b>REFERÊNCIAS..... 22</b>  |
|                       | <b>SEGUNDA PARTE – ARTIGO* ..... 28</b>   |
|                       | <b>ARTIGO – A INCORPORAÇÃO PROFUNDA DE CALCÁRIO</b>   |
|                       | <b>PROMOVEAUMENTO DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM ÁREAS</b>  |
|                       | <b>DE ABERTURA? ..... 29</b>  |
| <b>1</b>              | <b>INTRODUÇÃO..... 30</b>   |
| <b>2</b>              | <b>MATERIAL E MÉTODOS ..... 31</b>  |
| <b>2.1</b>            | <b>Experimentos de incubação em casa de vegetação ..... 31</b>  |
| <b>2.2</b>            | <b>Caracterização das áreas experimentais dos experimentos de campo ..... 32</b>                                    |
| <b>2.3</b>            | <b>Delineamento experimental e condução dos experimentos no campo ..... 35</b>                                      |
| <b>2.4</b>            | <b>Coleta, preparo e quantificação de nutrientes nas amostras de solo ..... 37</b>                                  |
| <b>2.5</b>            | <b>Análise foliar da soja ..... 37</b>  |
| <b>2.6</b>            | <b>Componentes de produção e produtividade..... 37</b>  |
| <b>2.7</b>            | <b>Análise estatística ..... 38</b>   |
| <b>3</b>              | <b>RESULTADOS ..... 38</b>  |
| <b>3.1</b>            | <b>Incubação do solo..... 38</b>  |
| <b>3.2</b>            | <b>Efeito da aplicação das doses de calcário nos atributos químicos do solo no<br/>experimento de campo..... 41</b> |
| <b>3.3</b>            | <b>Efeito da aplicação das doses de calcário nos teores de nutrientes nas folhas da<br/>cultura da soja..... 48</b> |
| <b>3.4</b>            | <b>Efeito da aplicação de calcário na altura e produtividade de grãos das culturas. 51</b>                          |
| <b>3.5</b>            | <b>Análise de componentes principais (PCA) ..... 53</b>   |
| <b>4</b>              | <b>DISCUSSÃO ..... 54</b>   |
| <b>4.1</b>            | <b>Atributos químicos do solo..... 54</b>   |
| <b>4.2</b>            | <b>Teores de nutrientes nas folhas da soja ..... 59</b>   |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>4.3</b> | <b>Altura das plantas e produtividade das culturas em função das doses de calcário</b> | <b>60</b> |
|            | .....  |           |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>64</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>65</b> |
|            | <b>APÊNDICE .....</b>  | <b>71</b> |

## **PRIMEIRA PARTE**

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve grande expansão de áreas com culturas anuais, através da incorporação de novas áreas de cultivo e, principalmente, ocupação de pastagens degradadas. Somente nos últimos 10 anos houve um incremento de quase 1,5 milhão de hectares por ano, apenas com a cultura da soja (CONAB, 2021). E mesmo assim, estima-se que existam no Brasil Central quase 50 milhões de hectares de pastagens em algum estado de degradação, com solos ácidos e baixos teores de nutrientes básicos (CARVALHO *et al.*, 2017).

Além dos baixos teores de nutrientes encontrados nos solos da maioria das áreas de abertura, grande parte deles apresentam elevada acidez do solo, altos teores de  $Al^{3+}$ , e em alguns casos, podendo apresentar  $Mn^{2+}$  em níveis tóxicos (CAIRES *et al.*, 2003). Essas características limitam o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, reduzindo a absorção de água e nutrientes (RAIJ, 2011a). Além disso, mesmo após a correção inicial, a utilização constante de fertilizantes nitrogenados, bem como a alta exportação de nutrientes pelas culturas, em sistemas de cultivos cada vez mais intensivos com a duas a três culturas por safra, contribuem para acidificação do solo (NATALE *et al.*, 2012; RAIJ, 2011b).

Quando o objetivo é reduzir a acidez do solo, não há dúvidas de que a prática a ser realizada é a calagem, sendo o calcário o corretivo mais utilizado no Brasil, principalmente devido sua grande disponibilidade, que é estimada em 45 bilhões de toneladas no país (BRASIL, 2005). Nos últimos 50 anos, o Brasil acumulou uma vasta experiência no manejo de solos, o que foi um dos principais fatores para a expansão da agricultura na região dos solos sob cerrados (SILVA, 2018). Inclusive, vários métodos de recomendação de calagem foram desenvolvidos para as diferentes regiões brasileiras.

Embora haja diferenças nas metodologias e conceitos por trás dos métodos de recomendação, há consenso de que, para que a calagem tenha seu efeito esperado, a dose recomendada deve ser suficiente para elevar o pH ( $H_2O$ ) do solo a valores entre 6,0 e 6,5, neutralizar o Al tóxico e disponibilizar  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em níveis adequados. Para o estado de Minas Gerais, Alvarez *et al.* (1999) consideram que a faixa contendo os níveis adequados de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , são de 2,4 a 4,0 e 0,9 a 1,5  $cmol_c\ dm^{-3}$ , respectivamente.

Para correção do solo, doses calculadas pelas metodologias atuais, muitas vezes não têm alcançado eficiência na correção da acidez e na elevação dos teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  acima dos níveis críticos. A completa correção da acidez e elevação dos teores de nutrientes básicos só ocorre depois de outras aplicações de corretivos, após dois a três anos. Com isso, muitos

técnicos de campo têm utilizado doses de calcário de 2 a 3 vezes maiores do que às recomendadas pelos métodos oficiais, porém, sem embasamento científico. Além disso, alguns estudos desenvolvidos na região do Brasil Central têm demonstrado, que na maioria dos casos, as doses necessárias para a correção da acidez têm sido maiores do que as recomendadas pelos métodos oficiais (BARBOSA FILHO; SILVA, 2000; FAGERIA, 2001; FAGERIA; STONE, 2004; MORAES, 2019; RAIJ, 2011b), mostrando necessidade de novos estudos.

Devido aos frequentes veranicos ocorridos no Brasil, principalmente durante os cultivos da segunda safra, alguns trabalhos científicos demonstram ganhos em produtividade e aumento da resiliência das culturas, quando as mesmas têm condições de aprofundamento do sistema radicular (MORAES, 2019; MOREIRA, 2019; MOREIRA; MORAES, 2018; RAIJ, 2011b).

Como o calcário é um sal de baixa solubilidade ( $\text{CaCO}_3$ :  $0,014 \text{ g L}^{-1}$  e  $\text{MgCO}_3$ :  $0,106 \text{ g L}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e com efeito inicial localizado (MOREIRA; MORAES, 2018), quando não é incorporado ao solo, acredita-se que sua incorporação e mistura às camadas mais profundas dos solos ácidos tropicais seja fundamental. Isso poderia proporcionar condições favoráveis ao maior desenvolvimento radicular em profundidade e, conseqüentemente, melhor aproveitamento da água e dos nutrientes presentes nas camadas corrigidas (NATALE *et al.*, 2012). Vale ressaltar, que normalmente as camadas sub superficiais dos solos ácidos brasileiros, geralmente apresentam baixos teores de cátions básicos e altos valores de Al trocável. Desta forma, acredita-se que seja imprescindível para se atingir altas produtividades, com menos riscos, buscar faixas de valores classificados como adequados a altos de nutrientes, pelo menos até a profundidade de 0,40 m, o que permitirá maior resiliência do sistema de produção (MOREIRA; MORAES, 2018; RESENDE *et al.*, 2016).

Dessa forma, objetivou-se com o presente estudo, avaliar a eficiência da aplicação de doses crescentes de calcário na correção da acidez do solo e o seu efeito nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em profundidade, além do seu efeito na produtividade das culturas de soja e sorgo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Acidez do solo

A acidez do solo é o atributo químico que mais limita a produtividade agrícola, isso porque interfere diretamente na disponibilidade de todos os nutrientes às culturas. Além disso, os solos ácidos normalmente têm altos teores de Al trocável e baixos teores de cátions básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ). Assim, em condições ácidas há uma drástica redução do crescimento tanto da parte aérea, como também do sistema radicular das plantas.

Os solos podem ser naturalmente ácidos devido à constituição do material de origem e condições do processo de intemperismo, como ocorre na grande maioria dos solos sob Cerrado, em que se têm baixos teores de cátions básicos (FAGERIA; GHEYI, 1999; LOPES, 1984; LOPES, 1998). Além disso, a acidez pode ser oriunda de altas exportações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , devido aos sucessivos cultivos agrícolas, bem como às adubações nitrogenadas, principalmente com fontes amoniacais, bem como a liberação de  $\text{H}^+$ , advindo da desprotonação de grupos orgânicos, originados da decomposição da matéria orgânica (MO) (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Durante a absorção de nutrientes catiônicos pelas plantas, ocorre exsudação de  $\text{H}^+$  ou liberação de radicais com cargas positivas, normalmente na forma componente da acidez do solo. Isso ocorre para manter a eletroneutralidade dentro das plantas, a qual exige que a resultante das cargas seja zero, ou seja, a soma de cargas positivas tem que ser igual à soma de cargas negativas (RAIJ, 2011a).

Didaticamente, a acidez do solo pode ser entendida de três formas, a acidez ativa, acidez trocável e acidez potencial (RAIJ, 2011a). A acidez ativa é denominada pelo hidrogênio que está na solução do solo na forma de  $\text{H}^+$ , podendo ser estimada por métodos potenciométricos e sendo representada pelos valores de pH, os quais podem variar entre 0 e 14, sendo que valores abaixo de 7 indicam acidez e valores acima alcalinidade (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Por sua vez a acidez trocável é constituída pelos íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ , que através de forças eletrostáticas ficam ligados na superfície dos coloides, estes que apresentam carga líquida negativa em sua maioria. No entanto, nas condições brasileiras, a maior parte da acidez trocável é representada pelo  $\text{Al}^{3+}$ , sendo possível encontrar  $\text{H}^+$  trocável apenas em condições específicas, como solos com altos teores de MO, menos comuns nas condições brasileiras (MOREIRA;

MORAES, 2018). Por último, a acidez não trocável, é determinada pelo H ligado covalentemente a cargas negativas variáveis e aos polímeros de Al, sendo a acidez potencial representada pela acidez trocável somada à acidez não trocável no solo (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Os elementos que constituem a acidez potencial representam o poder tampão do solo (RAIJ, 2011a). O poder tampão é definido pela resistência do solo à variação de pH, quando há a aplicação de compostos alcalinizantes, como calcários, ou acidificantes como fertilizantes nitrogenados (MOREIRA; MORAES, 2018; SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Geralmente, quando solos possuem altos teores de MO, apresentam alta acidez potencial, e isso se deve ao H estar ligado aos componentes das substâncias húmicas (grupos carboxílicos e fenólicos), podendo gerar desprotonação e liberar  $H^+$  na solução do solo. Além do mais, pelo fato de se encontrar mais  $H^+$  e  $Al^{3+}$  trocável, ligado aos colóides, solos argilosos tendem a apresentar maior acidez trocável e/ou potencial, quando comparados aos solos arenosos. Conseqüentemente, solos argilosos tendem a apresentar maior poder tampão do que os arenosos nas condições tropicais (RAIJ, 2011a; SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Para reduzir os prejuízos causados pela acidez do solo, antes do estabelecimento de uma lavoura, é fundamental realizar a calagem. Isso porque, além de elevar o pH e neutralizar o  $Al^{3+}$  e o  $Mn^{2+}$  tóxico, com a calagem aumenta-se os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e os valores de saturação por bases (V%) (FAGERIA, 2001). De acordo com Rangel, Rao e Horst (2009), a reação do calcário no solo disponibiliza Ca e Mg, além de gerar as bases  $OH^-$  e  $HCO_3^-$ , capazes de neutralizar os íons  $Al^{3+}$  e  $H^+$ , elevando-se os valores de pH, tendo conseqüências diretas no aumento da atividade biológica e na maior eficiência dos fertilizantes, devido a maior disponibilidade de nutrientes às plantas.

No entanto, algumas características como dose, granulometria, reatividade do corretivo, poder tampão do solo e precipitação, podem influenciar na eficiência do calcário e na correção da acidez do solo (GONÇALVES *et al.*, 2011; MELLO *et al.*, 2003; MIRANDA *et al.*, 2005).

## 2.2 Métodos de recomendação de calagem

Dentre os métodos utilizados para cálculo da necessidade de calagem no Brasil central, destacam-se o método da Saturação por Bases (método de São Paulo) e o método da Neutralização do Alumínio Tóxico e Elevação dos Teores de Ca e Mg (método de Minas Gerais). Esse último considera a quantidade de calcário necessária para neutralizar a acidez

trocável, somada com a quantidade para elevar os teores de Ca e Mg, considerados adequados para as culturas (MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999). Indiretamente, o método de Minas Gerais considera o poder de tamponamento dos solos, por considerar que solos mais argilosos apresentam maior necessidade de calcário do que os mais arenosos. Uma das críticas desse método é que considera a necessidade de Ca + Mg para a maioria das culturas anuais como sendo  $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Por sua vez, o próprio boletim de recomendação de corretivos e fertilizantes de Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), considera que os níveis adequados (classes Bom e Muito Bom) de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  são teores acima de 2,4 e 0,9  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente.

O método de recomendação de calagem mais adotado no Brasil é o método da saturação por bases, chamado 'método de São Paulo', o qual considera a quantidade de calcário necessária para se elevar a V% a valores adequados para cada uma das culturas, sendo 60 para soja e 70 para o algodão, feijão, milho, sorgo e trigo (RAIJ, 2011a). O conceito de V% está relacionado ao fornecimento de cátions básicos (Ca, Mg e K) em níveis ótimos para o desenvolvimento de plantas, visando a produção máxima econômica das culturas (FAGERIA, 2001).

Outro método de recomendação de calagem bastante utilizado, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, é o método SMP (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961). Através de uma solução tamponada a pH 7,5, conhecida como solução SMP, se determina o pH do solo (TOMÉ JÚNIOR, 1997), a partir do valor obtido, é possível estabelecer uma determinada quantidade de calcário para elevar o pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) do solo a 5,5, 6,0 ou 6,5 (RAIJ, 2011a). Tais doses de calcário já foram estabelecidas e tabeladas a partir da incubação de solos com  $\text{CaCO}_3$ , e, para obtê-la, basta entrar na tabela com o pH SMP da amostra e o pH do solo que se deseja (TOMÉ JÚNIOR, 1997). A calibração desse método é feita para cada tipo de solo, através de uma curva de calibração, relacionando os valores de  $\text{H}^+\text{Al}$  com o pH SMP da amostra (KAMINSKI *et al.*, 2002).

Na prática, as recomendações de calagem pelos métodos de neutralização do  $\text{Al}^{3+}$  e fornecimento de Ca e Mg, bem como o método da saturação por bases vêm sofrendo questionamentos, pois em muitos casos não se tem conseguido atingir os teores adequados de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , bem como neutralização do Al tóxico, com as doses calculadas pelos métodos. Muitas vezes são necessárias novas aplicações e incorporações de corretivos, dificultando o operacional das fazendas e reduzindo as produtividades das culturas nos primeiros anos de cultivo.

É possível também encontrar trabalhos na literatura que apontam para maior necessidade de calcário em alguns solos do que a calculada pelos métodos. Fageria (2001) observou que, para atingir V% de 56 e 66, foram necessárias, respectivamente, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 69,2%, em um Latossolo Vermelho com 33% de argila e V% inicial de 31. Barbosa Filho e Silva (2000) demonstraram que em um Latossolo Vermelho com 38% de argila, capacidade de troca de cátions (CTC) potencial de 7,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V% inicial de 29,1, houve a necessidade da aplicação de 15 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (100% de PRNT) para elevar a V% a 60 na camada de 0,0-0,20 m. Nesse caso, através do método de saturação por bases, a dose calculada para elevar a V% a 70, seria de apenas 3,2 Mg ha<sup>-1</sup>.

Em outro estudo, sob condições de Cerrado, Fageria e Stone (2004) observaram a necessidade de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (PRNT 88,3%) para atingir a V% de 72 e 41 nas camadas de 0,0-0,10 m e de 0,10-0,20 m, respectivamente em um Latossolo Vermelho com 37% de argila e V% inicial de 36. Neste caso, a dose calculada pelo método de saturação por bases, para elevar a V% a 70 havia sido de 3,1 Mg ha<sup>-1</sup>.

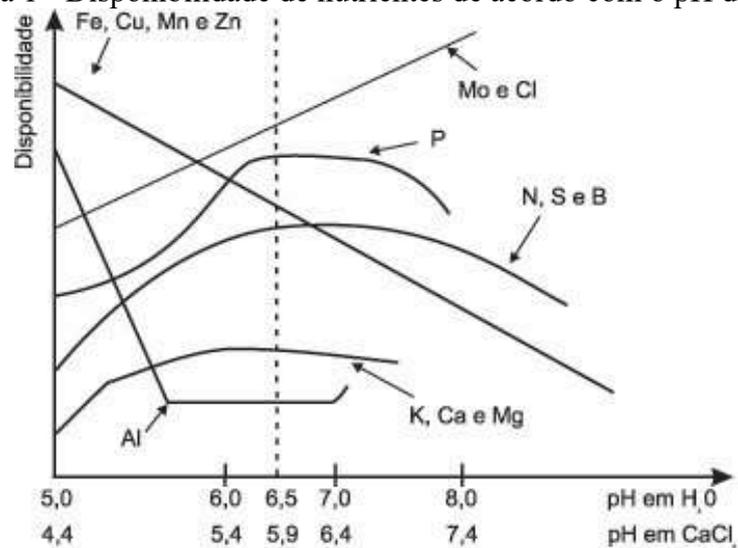
Recentemente, Moraes (2019) observou em solos de três fazendas (Santa Helena, Ingaí e Muquém) na região do Campus das Vertentes, a necessidade de doses de calcário superiores às recomendadas pelo método da saturação por bases, para se atingir valores de V% satisfatório. No solo da Fazenda Santa Helena, com 54% de argila e T (CTC a pH 7,0) de 4,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, para elevar a V% inicial de 42 a valores próximos de 70 na camada de 0,0-0,20 m, foi preciso aplicar uma dose de 9 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 83%, incorporado de 0,0-0,40 m de profundidade. Na Fazenda Ingaí, com solo de 40% de argila, T de 9,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V% inicial de 24, foi necessário aplicar 15 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 77%, incorporado na camada de 0,0-0,40 m, para se atingir a V% próxima a 80 na camada de 0,0-0,20 m. Já no solo da Fazenda Muquém, com 46% de argila e T de 9,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, aplicou-se 12 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 83%, incorporado de 0,0-0,40 m, para se elevar a V% inicial de 54 para próximo de 80 na camada de 0,0-0,20 m. Se as recomendações de calagem fossem realizadas através do método da saturação por bases, utilizando os mesmos calcários em seus respectivos solos e incorporados na camada de 0,0-0,40 m, seriam necessários 3,2, 13,8 e 5,7 Mg ha<sup>-1</sup>, para atingir V% de 70, 80 e 80 nas Fazenda Santa Helena, Ingaí e Muquém, respectivamente.

É possível observar que a recomendação de calagem pelos métodos oficiais não tem sido suficiente na correção da acidez. Desta forma, é fundamental realizar novos estudos que visem a correção do perfil do solo, tendo como objetivo o aumento de produtividade das culturas produtoras de grãos.

### 2.3 Calagem e disponibilidade de nutrientes

Várias características do solo podem influenciar na disponibilidade de nutrientes às plantas, dentre elas, podem ser citadas o teor de MO, temperatura, umidade, potencial redox, atividade microbológica, competição por sítios de adsorção, acidez do solo, além do próprio sistema de cultivo (FAGERIA; BALIGAR; CLARK, 2002; MOREIRA *et al.*, 2017). Sabe-se que doses baixas e/ou elevadas de calcário alteram os valores de pH podendo causar grandes problemas na disponibilidade de todos os nutrientes (FIGURA 1), além da redução da produtividade das culturas. Doses excessivas de calcário podem elevar o pH a valores iguais ou acima de 7, podendo provocar deficiências de nutrientes como P, Zn, B e Mn (FOLONI *et al.*, 2008).

Figura 1 - Disponibilidade de nutrientes de acordo com o pH do solo.



Fonte: Malavolta (1980).

Como já foi mencionado, a calagem é realizada buscando-se corrigir a acidez do solo, neutralizar o  $\text{Al}^{3+}$  e o  $\text{Mn}^{2+}$  quando em níveis tóxicos, além de aumentar a disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  às culturas, bem como melhorar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, aumentando a eficiência de uso dos nutrientes e da água que estão no solo (RAIJ, 2011a).

A elevação do pH, como citada anteriormente, reduz a disponibilidade dos micronutrientes metálicos por terem sua solubilidade reduzida na solução do solo, deixando-os menos disponíveis às plantas (RHOTON, 2000). Segundo Barber (1995), quando os valores de pH estão próximos a 7, há formação de compostos de baixa solubilidade e redução da

concentração de micronutrientes catiônicos na solução do solo, proporcionando um decréscimo do seu fluxo difusivo.

Diversos fatores podem influenciar na quantidade de B adsorvidos no solo, como por exemplo: concentração da solução em equilíbrio, textura do solo, pH, teor de MO e composição mineralógica do solo, dentre outros (ELRASHIDI; O'CONNOR, 1982; GOLDBERG; GLAUBIG, 1985; KEREN; BINGHAM; RHOADS, 1985; YERMIYAHU; KEREM; CHEN, 1995). De acordo com Evans (1987), quando o pH se encontra na faixa alcalina ocorre uma expressiva adsorção do B pelos óxidos e MO, alcançando a máxima adsorção a pH 9,0. Também pode haver adsorção do B aos hidróxidos de alumínio, formados após a precipitação do  $Al^{3+}$  pela calagem (PRODRUMU, 2004; ROSOLEM; BISCARO, 2007; SOUZA; ROSOLEM; COUTINHO, 1997).

Algumas características dos solos podem resultar na redução da disponibilidade de Zn, tais como: pH em valores próximos a 7,0 (FORNES *et al.*, 2009; LINDSAY, 1991); solos que possuem características argilosa, ou seja, com mais de 35% de argila (SHUKLA; MITTAL, 1979), P elevado (ALLOWAY, 1990; BARROW, 1987), altos teores de MO (MANDAL; MANDAL, 1987; STEVENSON, 1991; UREN, 1992) e também de óxidos de Fe, Al e Mn (McBRIDE, 1989; STAHL; JAMES, 1991), além do seu potencial redox (GAO *et al.*, 2010).

Em experimento utilizando-se doses crescentes de calcário em superfície de um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilo-arenosa nas culturas de milho e soja, Caires *et al.* (2006) verificaram que houve redução dos teores de Zn e Mn nas folhas de soja, mas não houve decréscimo na produtividade da cultura. Fonseca, Caires e Barth (2010), ao analisarem folhas de trigo, constataram que maiores doses de calcário levam à redução na concentração de Mn. No entanto, não afetam as concentrações de Cu, Fe e Zn nas folhas. Por sua vez, Soratto e Crusciol (2008), em experimento com aveia preta cultivada sob sistema de plantio direto (SPD) em um Latossolo Vermelho, submetido a altas doses de calcário, mostraram que houve decréscimo na absorção de Mn, Fe e Zn.

Moraes (2019) ao estudar doses crescentes de calcário em Latossolos Vermelho Amarelo com as culturas da soja e feijão, observou que, com o acréscimo das doses de calcário, ocorreu redução nas concentrações de B e aumento das concentrações de Fe nas folhas das duas culturas, contudo, ainda permaneceram dentro da faixa considerada ideal por Raij *et al.* (1997). Neste mesmo estudo, as concentrações de Zn e Mn não apresentaram diferença significativa na soja, no entanto, tiveram redução no feijoeiro, ainda assim se mantiveram dentro dos limites adequados de acordo com Raij *et al.* (1997). Para os nutrientes N, P e S, o aumento das doses,

promoveu aumento na absorção desses nutrientes pelas plantas de soja, no entanto, dos três, apenas o S estava dentro da faixa considerada ideal por Raij *et al.* (1997). No trabalho de Moraes (2019) ainda foi observado que a elevação das doses não modificou estatisticamente os teores de B, Cu, Fe e Mn, mas proporcionou aumento dos teores de Zn no solo da Fazenda Santa Helena. Na Fazenda Muquém, os micronutrientes B e Fe tiveram seus teores reduzidos conforme foi aumentadas as doses de calcário, já o Cu, Mn e Zn não apresentaram redução significativa.

Em princípio, as reduções da disponibilidade de micronutrientes, quase sempre estão associadas a situações com aumento excessivo do pH (MOREIRA *et al.*, 2017; MOREIRA; MORAES, 2018) e, geralmente no Brasil, as ocorrências de altos valores de pH estão correlacionadas à super calagem. No entanto, esta explicação pode não ser sempre correta, pois altos teores de Zn e Mn foram encontrados nas camadas superficiais de solos sob SPD, mesmo quando o pH e a MO estavam altos (MOREIRA *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2016; TEIXEIRA; SOUZA; BORÉM, 2003).

De maneira geral, é possível observar a necessidade de novos estudos que correlacionem a aplicação de calcário com a disponibilidade de micronutrientes para as culturas produtoras de grãos, visando estabelecer um equilíbrio entre a correção do solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

## **2.4 Calagem para construção da fertilidade do perfil do solo**

A construção da fertilidade do solo é um conjunto de práticas para transformar solos ácidos e com baixos teores de nutrientes, em solos com teores adequados e/ou altos de nutrientes. Dentre essas práticas, destacam-se a calagem, a gessagem e adubações corretivas (RESENDE *et al.*, 2016). Tais práticas podem ser realizadas de uma única vez ou durante as primeiras safras, procurando-se aliar técnicas para alcançar adequados teores de MO (LOPES; GUILHERME, 2012, 2016).

Um solo de fertilidade construída tem como características um elevado nível de tamponamento e um alto poder de resiliência, resultando em um ambiente com grande potencial de produção (RESENDE *et al.*, 2016). Kappes e Zancanaro (2014) conceituam os solos de fertilidade construída, como aqueles que, inicialmente, eram inapropriados para o cultivo. No entanto, com a realização de manejos químicos, físicos e biológicos adequados ao longo do tempo proporcionaram elevados rendimentos às culturas.

É importante que, em um solo com fertilidade construída, a quantidade de calcário aplicada e sua incorporação sejam satisfatórias para corrigir a acidez e ainda permitir um residual para que seu efeito se estenda por um maior período. Desta forma, posteriormente, apenas a calagem superficial deve ser suficiente para promover o fornecimento de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e a correção dos futuros processos de acidificação que ocorrerão com o tempo (RESENDE e *et al.*, 2016).

Como já foi mencionado anteriormente, a calagem é o método de menor custo e o mais efetivo para alterar a disponibilidade dos nutrientes e melhorar o ambiente do crescimento radicular. Dessa forma, a prática da calagem é a primeira etapa na construção da fertilidade do solo. Moreira e Moraes (2018) citam que o aprofundamento e desenvolvimento das raízes são afetados pelo  $\text{Al}^{3+}$ , assim como Lopes e Guilherme (1994) evidenciam que o aumento dos teores de Ca no solo é fundamental para uma maior tolerância das culturas a veranicos, visto que permite uma maior exploração das raízes não só na camada de 0,0-0,20 m, como também nas camadas mais profundas, atualmente denominado de ‘perfil do solo’.

O calcário é um produto de baixa solubilidade e mobilidade reduzida no perfil do solo. Assim é fundamental a sua incorporação em uma profundidade mínima de 0,30 a 0,40 m antes da implantação do SPD, visto que após o seu estabelecimento, o revolvimento do solo não é mais desejado (MOREIRA, 2019; MOREIRA; MORAES, 2018). Além disso, outra prática recomendada buscando construir a fertilidade nas camadas mais profundas é a utilização do gesso agrícola, o qual tem alta solubilidade, conseguindo percolar no perfil do solo.

O gesso, diferentemente do calcário, não é considerado um corretivo, pois não altera valores de pH, mas sim um condicionador, amenizando a toxidez do  $\text{Al}^{3+}$ , sendo fonte de S e Ca para as camadas subsuperficiais além de auxiliar na percolação no solo dos nutrientes Ca, Mg e K associados ao sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ). Ramos *et al.* (2006) e Caires *et al.* (2004) destacaram a importância do uso do gesso como melhorador do ambiente radicular e, conseqüentemente, na redução dos efeitos dos veranicos na região do Cerrado brasileiro, o qual apresenta condição de acidez em pelo menos 80% de suas áreas. Segundo Ritchey, Silva e Costa (1982), solos que apresentam baixa concentração de Al e teores de Ca abaixo do ideal, o aporte de Ca é o principal fator responsável para um melhor desenvolvimento radicular em profundidade.

De acordo com resultados experimentais obtidos de um Latossolo Vermelho argiloso no Paraná, a associação do gesso com o calcário potencializou o condicionamento em subsuperfície, trazendo grandes benefícios como o acréscimo dos teores de Ca, redução do Al tóxico, além de propiciar uma moderada elevação do pH (CAIRES; FELDHAUS; BLUM,

2001). Inagaki *et al.* (2016) ainda mencionam que essa combinação promove um maior acúmulo de MO e, conseqüentemente, o aumento da atividade biológica. Caires *et al.* (2004) observaram um aumento linear nos teores de Ca do solo até 0,80 m de profundidade, com o aumento das doses de gesso (0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>) aplicadas em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa. Também foi notado um aumento linear na produção de grãos de milho com as doses aplicadas de gesso, somente quando se fez a calagem, demonstrando que as duas práticas são complementares entre si e que uma não substitui a outra.

Em outro trabalho mais recente, Moraes (2019) analisou diferentes doses de calcário em um Latossolo Vermelho Amarelo com 46% de argila, CTC potencial de 9,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e V% inicial de 54. Verificou que o maior incremento (21%) na produtividade da soja em relação ao controle ocorreu quando foi aplicada a maior dose (15 Mg ha<sup>-1</sup>). Com essa dose, foi atingida uma V% de 80 e teores de Ca de 6,4 e 5,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m respectivamente. Ressalta-se que se a dose fosse calculada através do método de Saturação por Bases procurando-se atingir esse valor de V%, ela seria de apenas 2,5 Mg ha<sup>-1</sup>.

Garbuio (2009) verificou a necessidade de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (PRNT 85% e T= 12,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) para se elevar os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> e aumentar 15% da produção de grãos de soja em um Latossolo Vermelho, com V% inicial de 9,7. De forma semelhante, Veronese (2011) alcançou um incremento de produtividade da soja de 20% quando aplicado 8 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (PRNT 76% e T = 10,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) em um Latossolo Vermelho-Amarelo com V% inicial de 27.

Em concursos de produtividade realizados no Brasil, como o promovido pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB), é possível verificar que as maiores produtividades de soja ocorreram nos cultivos realizados em solos sem restrições físicas e químicas para o desenvolvimento radicular. Normalmente, trata-se de solos com altos teores de Ca<sup>2+</sup> e ausência de Al<sup>3+</sup> em profundidade e V% acima de 50 até a camada de 0,60 m (CESB, 2020).

Dessa forma, é notório a necessidade de novos estudos, buscando doses corretas de calcário para uma efetiva correção da acidez, redução do Al tóxico e fornecimento de Ca e Mg em teores adequados, proporcionando um bom desempenho das culturas e, conseqüentemente, um bom retorno econômico aos produtores.

## REFERÊNCIAS

- ALLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soils. *In*: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Heavy Metals in Soils**. New York: Blackie Academic & Professional, 1990. p. 29-39.
- ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solo. *In*: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. v. 5, p. 314-316.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. p. 414.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 35, n. 7, p. 1317-1324, 2000.
- BARROW, N. J. The effects of phosphate on zinc sorption by a soil. **Journal of Soil Science**, [s.l.], v. 38, n. 3, p. 453-459, 1987.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Mineral Brasileiro 2004**. Parte III – Estatística por Substâncias. Informe Mineral. Brasília, DF, 2005. 130 p.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, [s.l.], v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001.
- CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 87-98, 2006.
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.
- CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **Pubvet**, [s.l.], v. 11, p. 947-1073, 2017.
- CESB. Comitê Estratégico Soja Brasil. **Soja: quebrando recordes**. CESB: 10 anos de máxima produtividade. Sorocaba: CESB, 2018. Disponível em: <http://www.cesbrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/11/LIVRO-CESB.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2020.

- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grão**. Brasília: Conab, 2021.
- ELRASHIDI, M. A.; O'CONNOR, G. A. Boron sorption and desorption in soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 46, n. 1, p. 27-31, 1982.
- EVANS, L. J. Retention of boron by agricultural soils from Ontario. **Canadian Journal of Soil Science**, [s.l.], v. 67, n. 1, p. 33-42, 1987.
- FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 36, n. 11, p. 1419–1424, 2001.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in Agronomy**, [s.l.], n. 77, p. 185-268, 2002.
- FAGERIA, N. K.; GHEYI, H. R. **Efficient crop production**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999.
- FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 73-78, 2004.
- FOLONI, J. S. S.; SANTOS, D. H.; CERESTE, E. J.; SALVADOR, J. P. Resposta do feijoeiro e fertilidade do solo em função de altas doses de calcário em interação com a gessagem. **Colloquium Agrariae**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.27-35, 2008.
- FONSECA, A. F.; 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**, [s.l.], v. 67, n. 1, p. 60–70, 2010.
- FORNES, F.; GARCIA-DE-LA-FUENTE, R.; BELDA, R. M.; ABAD, M. “Alperjo” compost amendment of contaminated calcareous and acidic soils: effects on growth and trace element uptake by Five Brassica species. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 100, n. 17, p. 3982-3990, 2009.
- GAO, X.; SCHRÖDER, T.; HOFFLAND, E.; ZOU, C.; ZHANG, F.; ZEE, S. E. A. T. M. van. Geochemical modeling of zinc availability for rice. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 74, n. 1, p. 301-309, 2010.
- GARBUIO, F. J. **Atributos químicos e biológicos do solo, nutrição e produção de grãos de soja influenciados pela calagem e pela cobertura de aveia preta em sistema plantio direto**. 2009. 99 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- GOLDBERG, S.; GLAUBIG, R. A. Boron adsorption on aluminum and iron oxide minerals. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 49, n. 6, p. 1374-1379, 1985.

GONÇALVES, J. R. P.; MOREIRA, A.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOAS, V.; LYRA, R. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s.l.], v. 33, n. 2, p. 369-375, 2011.

INAGAKI, T. M.; SÅ, J. C. M.; CAIRES, E. F; GONÇALVES, D. R.P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 231, p. 156-165, 2016.

KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; MARTINS, J. R.; SANTOS, E. J. S.; TISSOT, C. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 26, n. 4, 2002.

KAPPES, C.; ZANCANARO, L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção no Mato Grosso. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 30, 2014, Salvador. Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global. **Anais [...]**, Sete Lagoas: ABMS, p. 358-381, 2014.

KEREN, R.; BINGHAM, F. T.; RHOADS, J. D. Plant uptake of boron as affected by boron distribution between liquid and solid phases in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 297-302, 1985.

LINDSAY, W. L. Inorganic equilibria affecting micronutrients. **Micronutrients in Agriculture**, [s.l.], v. 4, p. 89-112, 1991.

LOPES, A. S. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1998.

LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 162 p.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, [s.l.], v. 137, p. 1-72, 2016.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária**. São Paulo: ANDA (Boletim Técnico, 5), 1994. 60 p.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. **Electronic International Fertilizer Correspondent**, [s.l.], n. 32, p. 29-57, 2012

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

MANDAL, L. N.; MANDAL, B. Transformation of zinc fractions in rice soils. **Soil Science**, [s.l.], v. 143, n.3, p. 205-212, 1987.

- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. *In: Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*, 1999. v. 5, p. 143-168.
- McBRIDE, M. B. Surface chemistry of soil minerals. Minerals in soil environments. **Soil Science Society of America**, [s.l.], v. 1, p.35-84, 1989.
- MELLO, J. C. A.; VILLAS-BOAS, R. L.; LIMA, E. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; BÜLL, L. T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo Distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 27, n. 3, p. 553-561, 2003.
- MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C.; REIN, T. A.; GOMES, A. C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 40, n. 6, p. 563-572, 2005.
- MORAES, F. A. de. **Doses de calcário na construção da fertilidade do perfil do solo**. 2019. 66 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2019.
- MOREIRA, S. G.; MORAES, F. A. Construção da Fertilidade do Solo para o Sistema de Produção de Culturas Anuais. *In: PAES, M. C.; VON PINHO, R. G.; MOREIRA, S. G. (Org.). Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil*. 21. ed. Sete Lagoas: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2018. 4. **Anais [...]**. v. 32, p. 347383, 2018.
- MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; KIEHL, J. D. C.; MARTIN NETO, L.; PAULETTI, V. Chemical forms in soils and bioavailability of manganese to soy bean under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 30, n. 1, p. 121-136, 2006.
- MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; KIEHL, J. de C.; PAULETTI, V.; MARTIN NETO, L. Chemical forms in soil and availability of manganese and zinc to soybean in soil under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 163, p. 41-53, 2016.
- MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V.; SILVA, B. M.; KIEHL, J. C.; SILVA, C. G. M. Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. **Acta Scientiarum-Agronomy**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 89-97, 2017.
- MOREIRA, S. G. Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. **Informações Agronômicas**, [s.l.], n. 4, p. 1-12, 2019.
- NATALE, W., ROZANE, D. E., PARENT, L. E., PARENT, S. É. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], p. 1294-1306, 2012.
- PRODROMU, K. P. Boron adsorption by amorphous Al(OH)<sub>3</sub> in the presence of low molecular weight organic acids. **Agrochimica**, [s.l.], v. 48, p. 172-176, 2004.

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

RAIJ, B. V. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações Agronômicas** **135**, set. 2011b.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC & Fundação IAC (Boletim Técnico), 1997. 285 p.

RAMOS, L. A.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

RANGEL, A. F.; RAO, I. M.; HORST, W. J. Intracellular distribution and binding state of aluminum in root apices of two common bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes in relation to Altoxicity. **Physiologia Plantarum**, [s.l.], v. 135, n. 2, p.162-173, 2009.

RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, n.156, p.1-19, 2016.

RHOTON, F. E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 64, p. 700-709, 2000.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 359.

RITCHEY, K. D.; SILVA, S. E.; COSTA, V. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science**, [s.l.], v. 133, n. 6, p. 378-382, 1982.

ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo VermelhoAmarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 42, n. 10, p. 1473-1478, 2007.

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**, [s.l.], n. 25, p. 274-276, 1961.

SHUKLA, U. C.; MITTAL, S. B. Characterization of zinc adsorption in some soils of India. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 43, n. 5, p. 905-908, 1979.

SILVA, C. M. D. Entre Fênix e Ceres: A grande aceleração e a fronteira agrícola no Cerrado. **Varia História**, [s.l.], v. 34, n. 65, p. 409-444, 2018.

- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Black oat phytomass and nutrient accumulation as affected by surface application of lime and phosphogypsum during establishment of no-tillage system. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 38, n. 4, p. 928-935, 2008b.
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez e Correção do Solo. *In*: NOVAIS, R. F.; BARROS, H. V. V. A. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205–274.
- SOUZA, E. C.; ROSOLEM, C. A.; COUTINHO, E. L. M. Sunflower response to boron as affected by liming. *In*: **Boron in soils and plants**. Dordrecht: Springer, 1997. p. 23-27.
- STAHL, R. S.; JAMES, B. R. Zinc sorption by iron oxides coated sand as a function of pH. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 55, n. 5, p. 1287-1290, 1991.
- STEVENSON, F. J. Micronutrients soil tests. Micronutrients in agriculture. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], p. 427-472, 1991.
- TEIXEIRA, I. R.; SOUZA, C. M.; BORÉM, A.; SILVA, G. F. Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Bragantia**, [s.l.], v. 62, n. 1, p. 119-126, 2003.
- TOMÉ JUNIOR., J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. p. 247.
- UREN, N. C. Forms, reactions, and availability of nickel in soils. *In*: **Advances in agronomy**. Academic Press, 1992. v. 48. p. 141-203.
- VERONESE, M. **Acidez do solo e produtividade da soja em função de calagem e rotação de culturas**. 2011. 106. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.
- YERMIYAHU, U.; KEREN, R.; CHEN, Y. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 405-409, 1995.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGO\***

## **ARTIGO – A INCORPORAÇÃO PROFUNDA DE CALCÁRIO PROMOVE AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM ÁREAS DE ABERTURA?**

Autores: Junior César Resende Silva<sup>1</sup>, Silvino Guimarães Moreira<sup>1</sup>, Francielle Roberta Dias de Lima<sup>1</sup>, Devison Souza Peixoto<sup>2</sup>, Hugo Carneiro de Resende<sup>1</sup>, Flávio Araújo de Moraes<sup>1</sup>, Josias Reis Flausino Gaudencio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras, <sup>2</sup> ICL América Latina.

### **RESUMO**

O sucesso para um bom estabelecimento do sistema de produção de grãos depende primeiramente da adequada correção da acidez do solo. No entanto, para atingir tal objetivo, a dose do corretivo deve ser suficiente para elevar os valores de pH e V%, bem como os teores de Ca e Mg aos níveis considerados ideais ao desenvolvimento das culturas de interesse. Desse modo, objetivou-se com esse estudo, avaliar a eficiência de doses crescentes de calcário na correção da acidez do solo, elevação dos teores de Ca e Mg, concentrações de nutrientes foliares, altura de plantas e produtividade das culturas de soja e sorgo. O trabalho foi conduzido em duas áreas experimentais localizadas na região do Triângulo Mineiro, sob um Latossolo Vermelho Amarelo Franco-arenoso e Latossolo Vermelho Argiloso. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em seis doses de calcário (0, 4, 8, 12, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>), incorporadas com grade de 32 polegadas, com o objetivo de alcançar a camada de 0,0-0,40 m de profundidade. De forma conjunta, foi realizado também, um experimento em casa de vegetação, incubando-se, de maneira proporcional, as mesmas doses utilizadas no campo, misturadas a um volume de 2 dm<sup>3</sup> de solo coletado na camada de 0,0-0,40 m, o qual foi avaliado os atributos químicos do solo após 90 dias. Nos experimentos de campo, as avaliações das concentrações dos nutrientes foliares foram realizadas na cultura da soja, e as avaliações dos atributos químicos do solo foram determinadas a partir de amostras de solo coletadas após a colheita da cultura de verão. De posse dos dados, eles foram submetidos a análise de variância e quando houve diferença entre as doses de calcário, a análise de regressão foi testada. De forma geral, foi possível observar que a calagem promoveu o aumento dos valores de pH e V% e dos teores de Ca e Mg e reduziu os teores de H+Al. As concentrações foliares de macro e micronutrientes permaneceram geralmente próximos ou acima do nível crítico. As produtividades apresentaram incremento de produtividade com a calagem, alcançando a máxima produtividade com doses próximas a 6,5 Mg ha<sup>-1</sup> e 20 Mg ha<sup>-1</sup> no Local1, com solo franco-arenoso e no Local2, com solo argiloso, respectivamente.

Palavras-chave: Calcário. Fertilidade do solo. Saturação por bases.

## 1 INTRODUÇÃO

Anualmente, somente a cultura da soja expande cerca de 1 a 1,5 milhão de hectares por ano, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021). Todo esse crescimento tem ocorrido em áreas com solos ácidos e com baixos teores de nutrientes básicos. Muitas são áreas de pastagens degradadas, pois estima-se que ainda existam no Brasil Central quase 50 milhões de hectares de pastagens em algum estado de degradação (CARVALHO *et al.*, 2017), que vem sendo ocupadas com soja e outras culturas.

Como a maioria das áreas de abertura são situadas sobre solos com baixos teores de nutrientes, elevada acidez e altos teores de  $Al^{3+}$  (CAIRES *et al.*, 2003), a primeira prática a ser realizada antes da implementação dos sistemas de produção é a adequada correção do solo, através da calagem. Na literatura, há consenso de que a dose recomendada, independentemente do método de recomendação, deve ser suficiente para elevar o pH ( $H_2O$ ) do solo a valores entre 6,0 e 6,5, neutralizar o Al tóxico e disponibilizar  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em níveis adequados às plantas. A faixa contendo os níveis adequados de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  são de 2,4 a 4,0 e 0,9 a 1,5  $cmol_c\ dm^{-3}$ , respectivamente, de acordo com Alvarez *et al.* (1999).

O principal problema observado em situações práticas é que as doses de calcário calculadas pelas metodologias atuais muitas vezes não são suficientes na correção da acidez e na elevação dos teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  acima dos níveis críticos, classes bom e muito bom, conforme Alvarez *et al.* (1999). A completa correção da acidez e elevação dos teores de nutrientes básicos só ocorre depois de outras aplicações de corretivos, normalmente após três a quatro anos. Com isso, muitos técnicos de campo têm utilizado doses de calcário de 2 a 3 vezes maiores do que as recomendadas pelos métodos oficiais, porém, sem embasamento científico. Além disso, alguns estudos desenvolvidos na região do Brasil Central têm demonstrado que na maioria dos casos, as doses necessárias para a correção da acidez têm sido maiores do que as recomendadas pelos métodos oficiais (BARBOSA FILHO; SILVA, 2000; FAGERIA, 2001; FAGERIA; STONE 2004; RAIJ, 2011b; MORAES, 2019), mostrando a necessidade de novos estudos.

Sabe-se que doses baixas e/ou elevadas de calcário alteram os valores de pH podendo causar grandes problemas na disponibilidade de todos os nutrientes, reduzindo a produtividade das culturas. Doses excessivas de calcário podem elevar o pH a valores iguais ou acima de 7, provocando assim, deficiências de nutrientes como P, Zn, B e Mn (FOLONI *et al.*, 2008). Com

a elevação do pH, os micronutrientes metálicos têm sua solubilidade reduzida na solução do solo, deixando-os menos disponíveis às plantas (RHOTON, 2000). Segundo Barber (1995), quando os valores de pH estão próximos a 7, há formação de compostos de baixa solubilidade e redução da concentração de micronutrientes catiônicos na solução do solo, proporcionando um decréscimo do seu fluxo difusivo.

Devido aos frequentes veranicos ocorridos no Brasil, principalmente durante os cultivos da segunda safra, têm sido demonstrados ganhos em produtividade e aumento da resiliência das culturas, em situações com emprego de doses de calcário acima das preconizadas pelos métodos oficiais (RAIJ, 2011b; MOREIRA; MORAES, 2018; MORAES, 2019; MOREIRA, 2019).

Como o calcário é um sal de baixa solubilidade e mobilidade no solo, pode-se esperar maior efeito quando há adequada mistura incorporação ao solo, principalmente em camadas mais profundas (MOREIRA; MORAES, 2018). Neste caso, as plantas teriam melhores condições de aprofundamento do sistema radicular e, conseqüentemente, fariam melhor uso da água e nutrientes (NATALE *et al.*, 2012), o que conferiria maior resiliência aos sistemas de produção (MOREIRA; MORAES, 2018; RESENDE *et al.*, 2016). No entanto, apesar de toda a discussão teórica sobre a importância da correção da acidez dos solos, além da camada de 0,0-0,20 m, não há estudos esclarecendo o efeito da aplicação e incorporação profunda de calcário na correção de solos ácidos, bem como na produtividade das culturas. Dessa forma, objetivou-se com o presente estudo avaliar a eficiência de doses crescentes de calcário na correção da acidez do solo, na disponibilidade de Ca e Mg e na produtividade das culturas de soja e sorgo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Foi realizado, inicialmente, um estudo em condições controladas, em casa de vegetação, cujos objetivos foram avaliar o poder tampão de solos com diferentes teores de argila. Posteriormente, instalou-se os experimentos de campo, adotando-se todo o manejo cultural empregado pelos produtores.

### **2.1 Experimentos de incubação em casa de vegetação**

Foi realizado um experimento de incubação, utilizando-se solo coletado antes da instalação dos experimentos, na profundidade de 0,0-0,40 m. Posteriormente, o solo foi passado

em peneira de malha 3 mm e em seguida homogeneizado. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições. As doses utilizadas foram de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 g de calcário, as quais foram misturadas em 2 dm<sup>3</sup> de solo, correspondendo às doses utilizadas no campo de 0, 4, 8, 12, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup> incorporadas na profundidade de 0,0-0,40 m. O calcário utilizado tinha as seguintes características: PRNT de 102%, 40,9 % de CaO e 16,9 % de MgO.

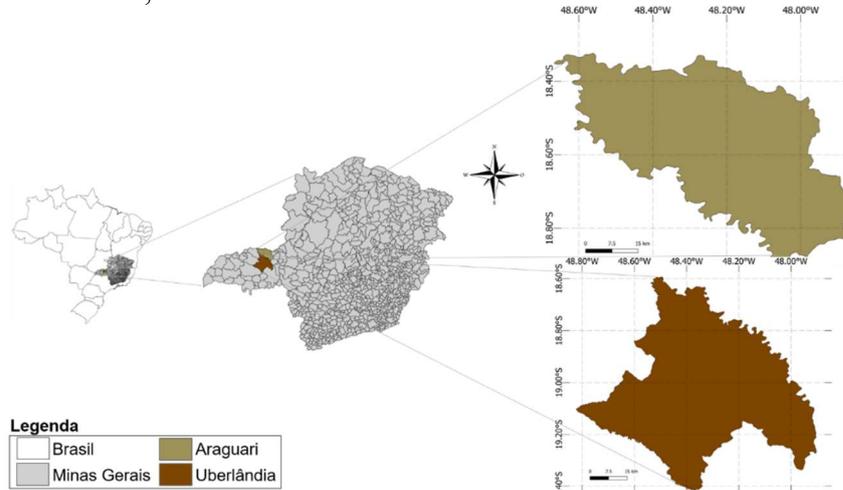
O solo foi acondicionado em vasos e ficaram incubados durante o período de 90 dias, corrigindo-se diariamente a umidade para 70% da capacidade de campo, através da pesagem de cada vaso. Após o período de incubação, coletou-se amostras em cada vaso, para a determinação das seguintes propriedades químicas do solo: pH em CaCl<sub>2</sub>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> trocáveis, H<sup>+</sup>Al, Al<sup>3+</sup>, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Silva (1999). A partir dos resultados foram calculadas a saturação por bases e capacidade de troca de cátions potencial.

## 2.2 Caracterização das áreas experimentais dos experimentos de campo

O trabalho foi realizado em condições de campo e de forma independente em duas áreas experimentais (FIGURA 1), sendo a primeira localizada na Fazenda Babilônia (Local1), no município de Uberlândia, Minas Gerais, com altitude de 830 metros e coordenadas -18.903351, -48.510089. A segunda área experimental situa-se na Fazenda Fundão (Local2), no município de Araguari, Minas Gerais, com altitude de 715 metros e coordenadas -18.753704, -48.243333. Os solos das áreas foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo Franco-arenoso e Latossolo Vermelho Argiloso, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), para a Fazenda Babilônia e Fundão respectivamente. O clima da mesorregião é do tipo Aw com nítida estação seca no inverno, com temperatura média do mês mais frio sendo superior a 18 °C e verão quente e úmido (KÖPPEN, 1900).

Nos dois municípios, durante a condução dos experimentos, a temperatura média do mês mais quente foi de 27 °C, e do mais frio, 21 °C (INMET). Os dados de precipitações durante a condução dos experimentos foram obtidos pelo banco de dados da Rede do INMET, os quais representam as duas fazendas e podem ser observados na Figura 2.

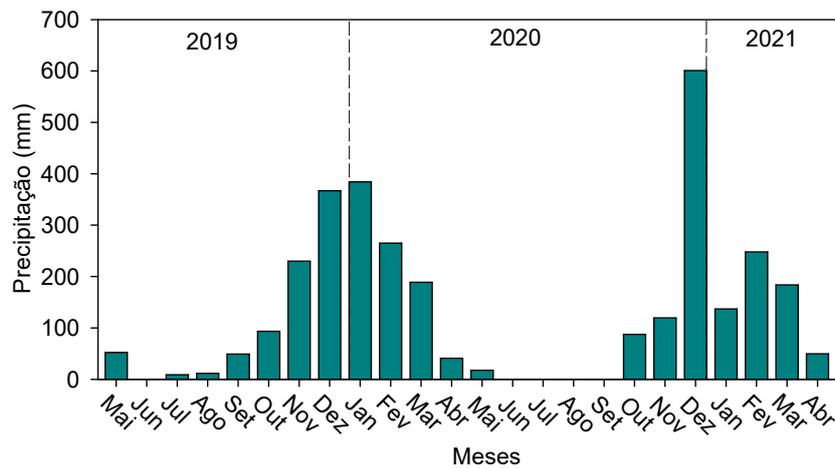
Figura 2 - Localização geográfica dos municípios de Araguari (Local1) e Uberlândia (Local2), Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Do autor (2021).

Antes da instalação dos experimentos, os solos estavam ocupados com pastagens degradadas. Na Tabela 1 podem ser visualizados os atributos químicos dos solos antes da instalação do experimento, e na Tabela 2 as classes texturais.

Figura 3 – Precipitação pluviométrica durante a condução dos experimentos.



Fonte: Do autor (adaptado da Rede do INMET).

Tabela 1 - Propriedades químicas dos solos em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento.

| Prof.                             | pH                | P   | K                       | S    | Ca  | Mg                                     | Al  | H+Al | CTC(T) | M.O. | V                       | B    | Cu  | Fe   | Mn   | Zn  |
|-----------------------------------|-------------------|-----|-------------------------|------|-----|--|-----|------|--------|------|-------------------------|------|-----|------|------|-----|
| m                                 | CaCl <sub>2</sub> | M1  | - mg dm <sup>-3</sup> - |      |     | - cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> - |     |      |        | %    | - mg dm <sup>-3</sup> - |      |     |      |      |     |
| <b>Local1 - Fazenda Babilônia</b> |                   |     |                         |      |     |  |     |      |        |      |                         |      |     |      |      |     |
| 0,0-0,20                          | 4,7               | 0,2 | 22,5                    | 3,5  | 1,2 | 0,5                                    | 0,2 | 1,8  | 3,58   | 1,5  | 49,72                   | 0,08 | 0,8 | 54,5 | 27,4 | 1,1 |
| 0,20-0,40                         | 4,4               | 0,2 | 11,3                    | 2,7  | 1,2 | 0,3                                    | 0,2 | 1,6  | 3,14   | 1,2  | 49,04                   | 0,06 | 0,7 | 54,7 | 18,1 | 0,5 |
| 0,40-0,60                         | 4,8               | 0,6 | 11,3                    | 2,2  | 0,9 | 0,3                                    | 0,1 | 1,5  | 3,00   | 0,9  | 40,96                   | 0,05 | 0,6 | 54,9 | 15,7 | 0,3 |
| <b>Local2 - Fazenda Fundão</b>    |                   |     |                         |      |     |  |     |      |        |      |                         |      |     |      |      |     |
| 0,0-0,20                          | 4,5               | 6,8 | 102,0                   | 11,9 | 1,2 | 1,1                                    | 0,6 | 5,3  | 7,87   | 3,3  | 32,66                   | 0,12 | 7,3 | 89,7 | 25,6 | 1,0 |
| 0,20-0,40                         | 4,4               | 6,8 | 49,3                    | 6,1  | 0,8 | 0,6                                    | 0,8 | 4,5  | 6,04   | 2,8  | 25,50                   | 0,10 | 7,3 | 85,7 | 16,2 | 0,4 |

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 2 - Conteúdo de areia, silte e argila e classificação textural dos solos em diferentes profundidades.

| Prof.<br>m                        | Areia              | Silte | Argila | Classificação textural |
|-----------------------------------|--------------------|-------|--------|------------------------|
|                                   | g kg <sup>-1</sup> |       |        |                        |
| <b>Local1 - Fazenda Babilônia</b> |                    |       |        |                        |
| 0,0-0,20                          | 759                | 91    | 150    | Franco-arenosa         |
| 0,20-0,40                         | 715                | 113   | 172    | Franco-arenosa         |
| 0,40-0,60                         | 659                | 121   | 220    | Franco-argiloarenosa   |
| <b>Local2 - Fazenda Fundão</b>    |                    |       |        |                        |
| 0,0-0,20                          | 100                | 381   | 519    | Argilosa               |
| 0,20-0,40                         | 90                 | 341   | 569    | Argilosa               |

Fonte: Do autor (2021).

### 2.3 Delineamento experimental e condução dos experimentos no campo

Em cada uma das áreas, utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por seis doses de calcário (0, 4, 8, 12, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>), aplicadas de forma superficial, nos dias 22 e 23 de maio de 2019, utilizando-se equipamento de distribuição por gravidade, Bruttus 6000 (Stara). Cada parcela foi constituída de 200 m<sup>2</sup>, sendo 20 m de comprimento por 10 m de largura. O calcário utilizado tinha as seguintes características: PRNT de 100%, 32,8% de CaO e 17,6 % de MgO. Logo após a aplicação do calcário, o corretivo foi incorporado com duas operações com grade pesada (discos de 32 polegadas), seguida de duas operações com grade niveladora (discos de 20 polegadas).

O manejo das culturas, como adubação, escolha de cultivares e proteção de plantas foram realizados de acordo com o manejo de cada área comercial, em que o experimento foi alocado. O histórico dos cultivos e manejos das áreas podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Histórico dos cultivos e manejos das áreas experimentais.

| <b>Local</b> | <b>Safra</b> | <b>Cultura</b> | <b>Cultivar</b> | <b>População<br/>(sementes/ha)</b> | <b>Plantio</b> | <b>Colheita</b> | <b>Adubação de semeadura</b> | <b>Adubação de cobertura</b> |
|--------------|--------------|----------------|-----------------|------------------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
| Local1       | 19/20        | Soja           | NS7901RR        | 300000                             | 01/11/2019     | 07/03/2020      | 180 kg/ha de NPK 11:54:00    | 160 kg/ha de KCl             |
| Local1       | 20/21        | Soja           | 5G8015IPRO      | 240000                             | 10/12/2020     | 09/04/2021      | 180 kg/ha de NPK 11:54:00    | 135 kg/ha de KCl             |
| Local2       | 19/20        | Soja           | NS7709IPRO      | 250000                             | 24/10/2019     | 21/02/2020      | 300 kg/ha de NPK 05:25:25    | 100 kg/ha de NPK 05:25:25    |
| Local2       | 20/20        | Sorgo          | Nugrain 430     | 245000                             | 15/03/2020     | 21/07/2020      | 300 kg/ha de NPK 05:25:25    | 230 kg/ha de Nitrato         |
| Local2       | 20/21        | Soja           | NS7709IPRO      | 280000                             | 04/11/2020     | 06/03/2021      | 400 kg/ha de NPK 08:28:16    | -                            |

Fonte: Do autor (2021).

## 2.4 Coleta, preparo e quantificação de nutrientes nas amostras de solo

Nos dois anos de experimento, após a colheita da cultura de verão (soja), foi realizada a amostragem de solo para avaliação de suas propriedades químicas dos solos, coletando-se cinco amostras simples por parcela, para compor uma amostra composta. As amostras foram coletadas com trado holandês nas profundidades de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m no Local2 e também na profundidade de 0,40-0,60 m no Local1.

No laboratório, as amostras foram secas em galpão de exaustão, destorroadas, e passadas em peneira de malha 2 mm, para se obter terra fina seca ao ar (TFSA). Nas amostras de solo da camada de 0,0-0,20 m foram determinados valores de pH em  $\text{CaCl}_2$ , teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  trocáveis,  $\text{H}^+\text{Al}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Silva (1999). Por sua vez, nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m não foram determinados os teores de micronutrientes. A partir dos resultados foram calculados a soma de bases (V%) e capacidade de troca de cátions em pH 7 (T).

## 2.5 Análise foliar da soja

A coleta de folha foi realizada no estágio R2 (florescimento pleno), coletando-se o terceiro trifólio desenvolvido da haste principal, contando do ápice para a base da planta. O material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar forçada, com temperatura entre 60 e 65 °C, até atingir peso constante. Em seguida, o material foi moído em moinho tipo Willy, usando-se peneira de 20 mesh. Após serem moídas, as amostras foram enviadas ao laboratório para determinação dos teores dos seguintes nutrientes: Ca, Mg, K, B, Cu, Fe, Mn e Zn, de acordo com os procedimentos descritos por Malavolta *et al.* (1997).

## 2.6 Componentes de produção e produtividade

A produtividade de grãos foi determinada a partir da colheita de 3 linhas com 5 metros de comprimento cada uma, em cada parcela experimental. Após a colheita, as plantas passaram pela trilhadora estacionária e os grãos foram pesados e tiveram sua umidade aferida. Para determinação da produtividade da área por parcela, a umidade foi corrigida para 13%. A partir da produtividade por parcela foi estimada a produtividade por hectare (10.000 m<sup>2</sup>).

Foi realizada a avaliação da altura de plantas, medindo-se 5 plantas aleatórias em cada parcela. Obteve-se também o peso de mil grãos, efetuando a contagem, pesagem e correção da umidade de 100 grãos. O resultado posteriormente foi extrapolado para mil grãos.

## 2.7 Análise estatística

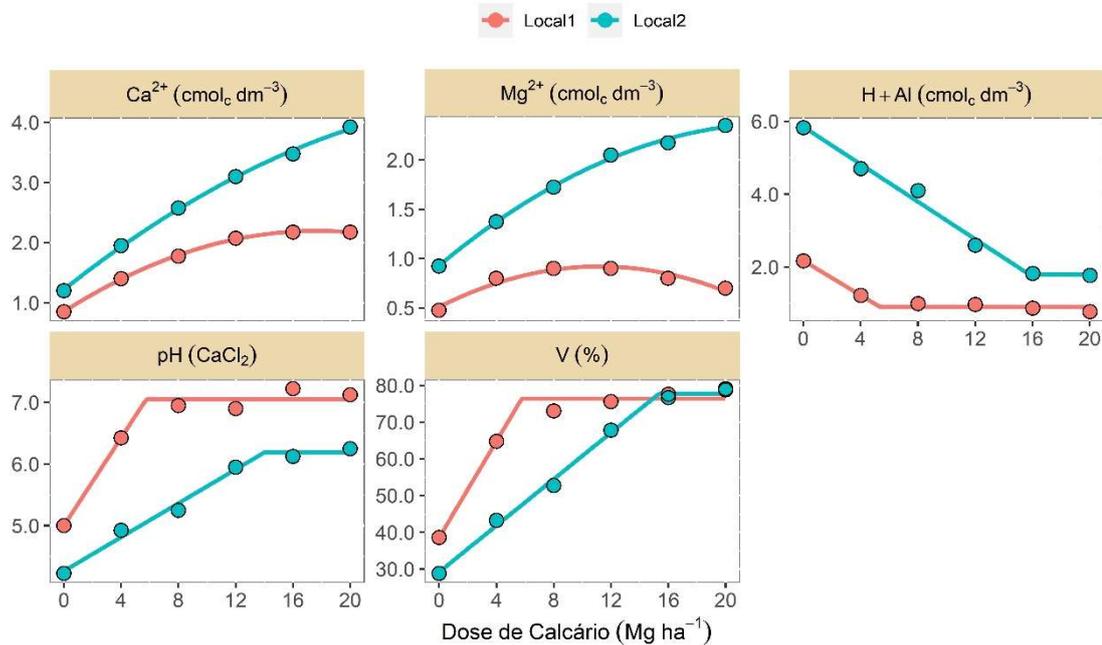
Os dados foram submetidos à análise de variância, e quando houve diferença entre as doses de calcário aplicadas (0, 4, 8, 12, 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>), a análise de regressão foi realizada para os dados das propriedades químicas do solo, produtividade e componentes de produção. Os modelos testados foram o linear, quadrático e linear platô. A escolha do modelo foi feita com base na significância dos parâmetros de ajuste, menor Critério de Informação de Akaike (AIC) e maior coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) dos atributos químicos do solo (camada 0,0-0,20m), produtividade e altura de plantas. Todas as análises e gráficos foram conduzidos no software R versão 3.6.3 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Incubação do solo

Os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> no solo apresentaram melhor ajuste com o modelo quadrático, para os dois locais. Por sua vez, para os atributos H+Al, pH e V%, o modelo ajustado foi o platô. No Local1, o teor máximo de Ca<sup>2+</sup> foi de 2,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, alcançado com a dose de 17,7 Mg ha<sup>-1</sup>. No Local2, a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> foi a que promoveu o máximo teor de Ca<sup>2+</sup>, de 3,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Para o Mg<sup>2+</sup>, o teor máximo foi de 0,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> no Local1, promovido pela dose 11,2 Mg ha<sup>-1</sup> e de 2,3 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> no Local2, promovido pela dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. No caso da acidez potencial, os menores valores de H+Al (0,91 e 1,79 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) foram observados a partir das doses de 5,3 e 15,8 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário para o Local1 e Local2, respectivamente.

Figura 4 – Atributos químicos do solo coletado da camada de 0,0-0,40 m antes da instalação dos experimentos, em função das doses de calcário.

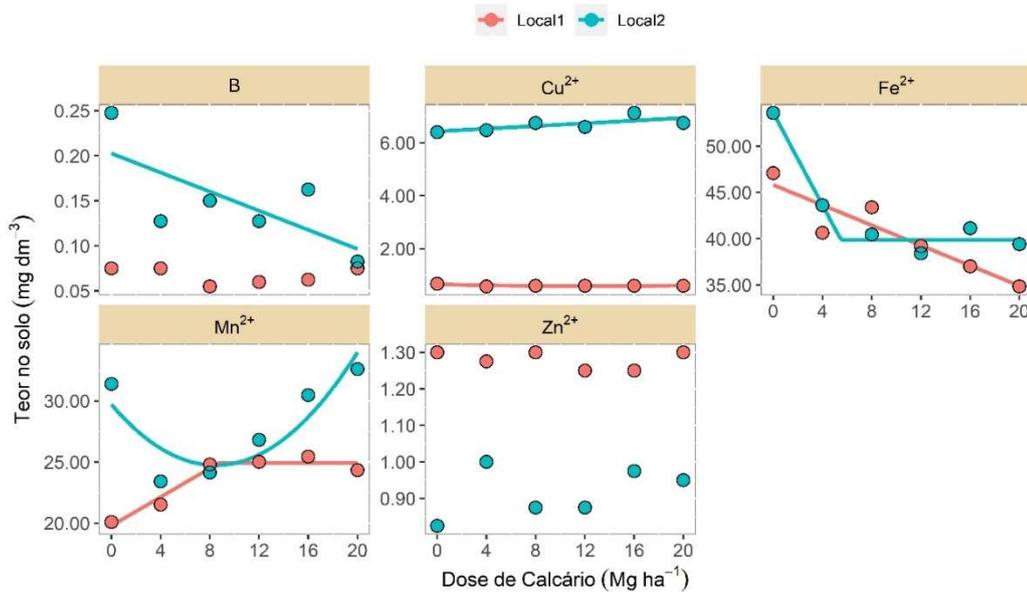


Fonte: Do autor (2021).

Para o atributo pH, o valor 7,0 foi o máximo alcançado no Local1, promovido a partir da dose 5,8 Mg ha<sup>-1</sup>. Por sua vez, o valor máximo de pH no Local2 foi de 6,2, promovido a partir da dose 14,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Para V%, o máximo valor observado foi de 76% no Local1, promovido pelas doses a partir de 5,8 Mg ha<sup>-1</sup>, no Local2, por sua vez, o valor máximo foi de 77%, promovido a partir da dose 15,3 Mg ha<sup>-1</sup>.

Os modelos de ajustes para os teores de micronutrientes no solo do experimento de incubação variaram entre os locais e entre os diferentes micronutrientes. Para o B, apenas o Local2 obteve ajuste com os modelos testados, o qual mostrou que o aumento das doses de calcário promoveu redução nos teores de B, saindo do teor de 0,20 mg dm<sup>-3</sup> no controle e atingindo o menor teor, que foi de 0,10 mg dm<sup>-3</sup>, na dose máxima testada. A redução proporcionou a mudança de classe do nutriente, de baixo para muito baixo, segundo Alvarez *et al.* (1999).

Figura 5 – Teores de micronutrientes do solo coletado da camada de 0,0-0,40 m antes da instalação dos experimentos, em função das doses de calcário.



Fonte: Do autor (2021).

Para o  $\text{Cu}^{2+}$ , os teores observados no Local1 variaram de  $0,65 \text{ mg dm}^{-3}$ , no tratamento sem aplicação de calcário para  $0,59 \text{ mg dm}^{-3}$ , na dose de  $12,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ . No Local2, o teor de  $\text{Cu}^{2+}$  saiu de  $6,4 \text{ mg dm}^{-3}$  no tratamento controle para o máximo de  $6,9 \text{ mg dm}^{-3}$ , na dose de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ . No entanto, deve-se ressaltar que, em ambos os casos, as diferenças foram pequenas, não alterando a faixa de disponibilidade do nutriente, de acordo com Alvarez *et al.* (1999), (valores baixos no Local1 e alto, no Local2).

O comportamento do  $\text{Fe}^{2+}$  foi semelhante nos dois locais. No Local1, o teor reduziu de  $45,8 \text{ mg dm}^{-3}$  nas parcelas sem aplicação de calcário para  $34,9 \text{ mg dm}^{-3}$  no local com a máxima dose ( $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). No Local2, o teor de  $\text{Fe}^{2+}$  reduziu de  $53,6 \text{ mg dm}^{-3}$  (tratamento controle) até de  $39,9 \text{ mg dm}^{-3}$  (dose de  $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Em ambos os locais, a faixa de disponibilidade do nutriente mudou de valores altos (no tratamento controle) para valores bons, com os menores teores encontrados (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Para o  $\text{Mn}^{2+}$  no Local1, o teor máximo foi de  $24,9 \text{ mg dm}^{-3}$ , alcançado a partir da dose  $8,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ . No Local2, o teor mínimo de  $\text{Mn}^{2+}$  foi de  $24,7 \text{ mg dm}^{-3}$ , promovido pela dose  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Após essa dose, o teor voltou a aumentar, atingindo valor máximo na dose de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ . De acordo com os modelos testados para os dois solos, não houve ajuste para os teores de  $\text{Zn}^{2+}$ , indicando que o aumento das doses de calcário não resultou em variações significativas para esse micronutriente. Vale ressaltar ainda, que mesmo com as variações dos teores, eles não

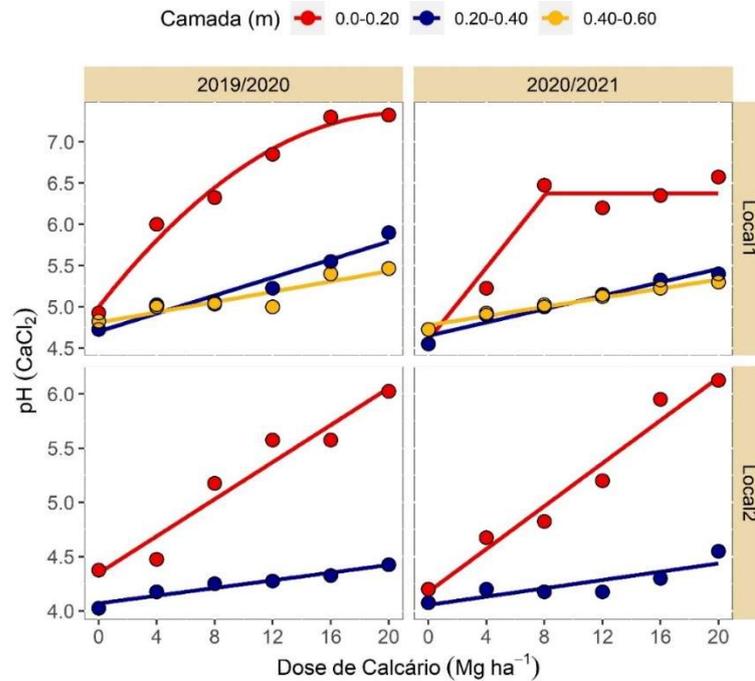
tiveram alteração de classe, permanecendo como valores altos de acordo com Alvarez *et al* (1999).

### **3.2 Efeito da aplicação das doses de calcário nos atributos químicos do solo no experimento de campo**

De maneira geral, os modelos de ajuste utilizados para explicar a relação entre os atributos avaliados e as doses de calcário variaram entre os locais e as profundidades. Nos experimentos de campo, para os atributos químicos da camada de 0,0-0,20 m tiveram predomínio o modelo platô no Local1 e, dos modelos quadrático e linear, no Local2. Nas demais camadas avaliadas, em ambos os locais, os modelos mais frequentes foram o linear e o platô.

A aplicação e incorporação das doses de calcário promoveram a elevação dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e valores de pH e V% e redução dos valores de H+Al nas profundidades avaliadas nos dois locais (FIGURAS 6 a 9). A incorporação do corretivo tinha como objetivo alcançar a profundidade de 0,40 m, no entanto, mesmo utilizando grade pesada, essa profundidade não foi atingida e esse fato pode ser observado através das diferenças entre os valores encontrados nas camadas de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m. Com base nos resultados encontrados na camada de 0,40-0,60 m, avaliada apenas no Local1, que tem como característica textura franco-arenosa, foi possível constatar que houve percolação do material até essa camada.

Figura 6 – Valor de pH nas profundidades de 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m no Local1 e nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m no Local2 em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).



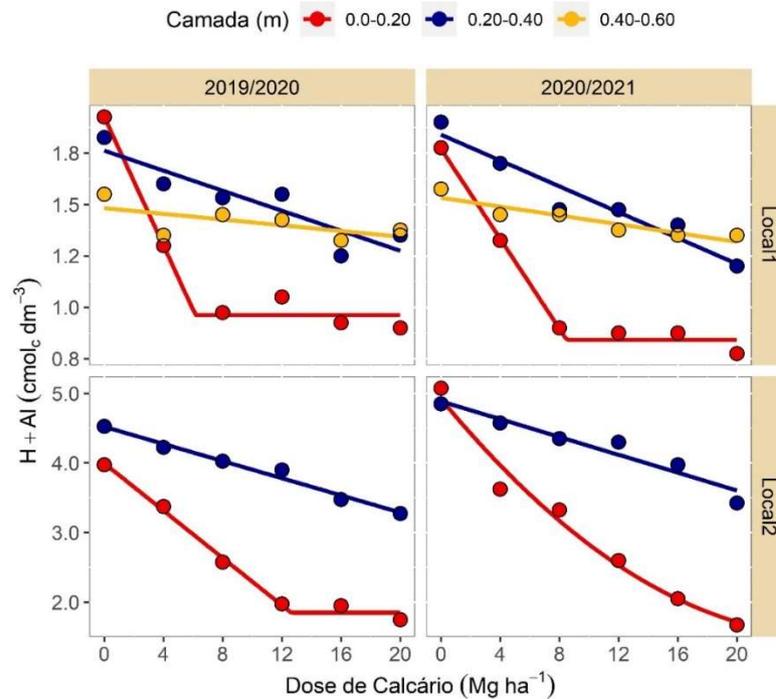
Fonte: Do autor (2021).

Os valores de pH tiveram reduções de uma safra para outra no Local1, nas três camadas avaliadas. Na camada de 0,0-0,20 m, valores de pH próximos a 7,4 foram observados nas parcelas que receberam doses de 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>. No entanto, no segundo ano, não se observou variação a partir da dose de 8,1 Mg ha<sup>-1</sup>, se mantendo com valor de pH de 6,4 até a dose 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Nas camadas de 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, os valores de pH tiveram pouca variação entre os dois anos, sendo os valores máximos obtidos com a maior dose, alcançando valores próximos de 5,6 na camada de 0,20-0,40 m e de 5,4 na camada de 0,40-0,60 m.

No Local2, os valores máximos de pH foram obtidos com a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> nas duas camadas e nos dois anos de cultivo. Nos dois anos de avaliação os valores máximos de pH ficaram próximos de 6,1 na camada de 0,0-0,20 m e 4,4 na camada de 0,20-0,40 m.

No caso da acidez potencial, os valores mínimos de H+Al (0,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na camada de 0,0-0,20 m foram alcançados quando se aplicaram doses próximas de 8 Mg ha<sup>-1</sup> nos dois anos de estudos no Local1. Nas demais camadas foi observado que a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> foi a que proporcionou os menores valores de H+Al (1,3 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) nos dois anos.

Figura 7 – Valor de H+Al das profundidades de 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m no Local1 e nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m no Local2 em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).

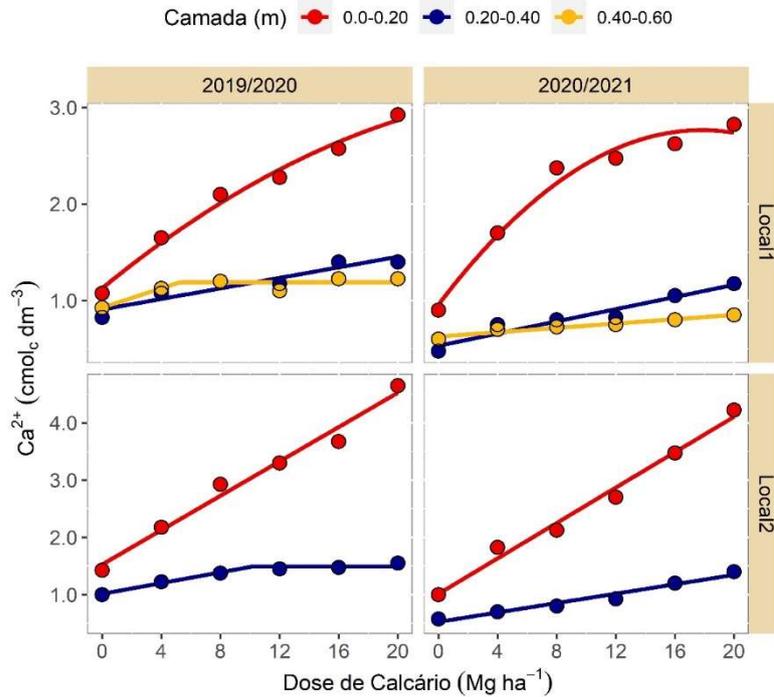


Fonte: Do autor (2021).

No Local2, os menores valores de H+Al encontrados nas duas camadas e nos dois anos avaliados, foram promovidos pela dose máxima testada, exceto para a camada de 0,0-0,20 m no primeiro ano, na qual se observou valor mínimo de 1,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> a partir da dose 12,6 Mg ha<sup>-1</sup>. Nessa mesma camada, no ano seguinte, foi observado o valor mínimo de 1,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Na camada de 0,20-0,40 m, os valores mínimos ficaram em torno de 3,4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para os dois anos.

Com relação aos teores Ca<sup>2+</sup>, inicialmente no solo do Local1, os teores máximos na camada de 0,0-0,20 m foram promovidos pela dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano, com teor de 2,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. No segundo ano, os teores máximos (2,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) foram observados com a dose de 17,8 Mg ha<sup>-1</sup>. Na camada de 0,20-0,40 m, os valores máximos de Ca nos dois anos foram observados quando se aplicou a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, alcançando valores próximos de 1,4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. A partir da dose de 5,3 Mg ha<sup>-1</sup>, não foi observado aumento do teor de Ca na camada de 0,40-0,60 m, no primeiro ano, permanecendo com teor de 1,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. No entanto, o teor máximo do segundo ano decresceu em relação ao primeiro, atingindo teor de 0,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

Figura 8 – Teor de  $\text{Ca}^{2+}$  das profundidades de 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m no Local1 e nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m no Local2 em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).

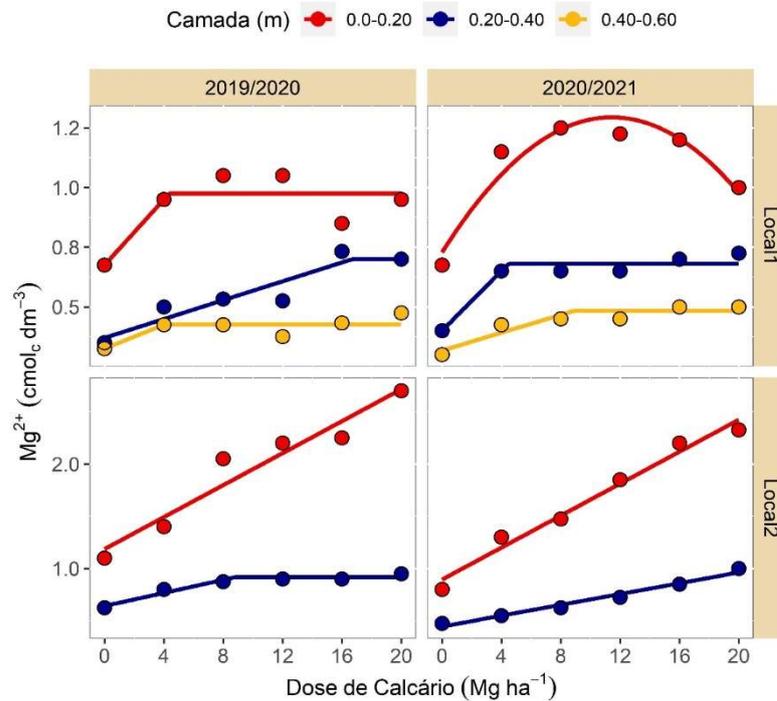


Fonte: Do autor (2021).

No Local2, os teores máximos de Ca foram observados nas parcelas que receberam a maior dose de calcário, alcançando teores próximos a  $4,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na camada de 0,0-0,20 m nos dois anos de cultivo. Na camada de 0,20-0,40 cm, a partir da dose  $10,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  não se observou acréscimo dos teores de Ca no primeiro ano, permanecendo em  $1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Por outro lado, no segundo ano o valor máximo de Ca observado na camada de 0,20-0,40 m foi de  $1,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , promovido pela aplicação da dose  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Com relação ao Mg do Local1, a partir da dose  $4,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  não houve aumento nos teores de Mg na camada de 0,0-0,20 m no primeiro ano, permanecendo em  $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . No entanto, no segundo ano, houve incremento nos teores de Mg até a dose de  $11,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , atingindo o teor de  $1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Na camada de 0,20-0,40 m o teor máximo de Mg se manteve em  $0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de um ano para o outro, sendo que no primeiro ano esse teor foi observado a partir da dose  $16,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  e no segundo ano a partir da dose  $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Para a camada de 0,40-0,60 m, o teor máximo de Mg se manteve próximo de  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nos dois anos, porém com doses a partir de  $4,1$  e  $8,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  no primeiro e segundo ano, respectivamente.

Figura 9 – Teor de  $Mg^{2+}$  das profundidades de 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m no Local1 e nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m no Local2 em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).

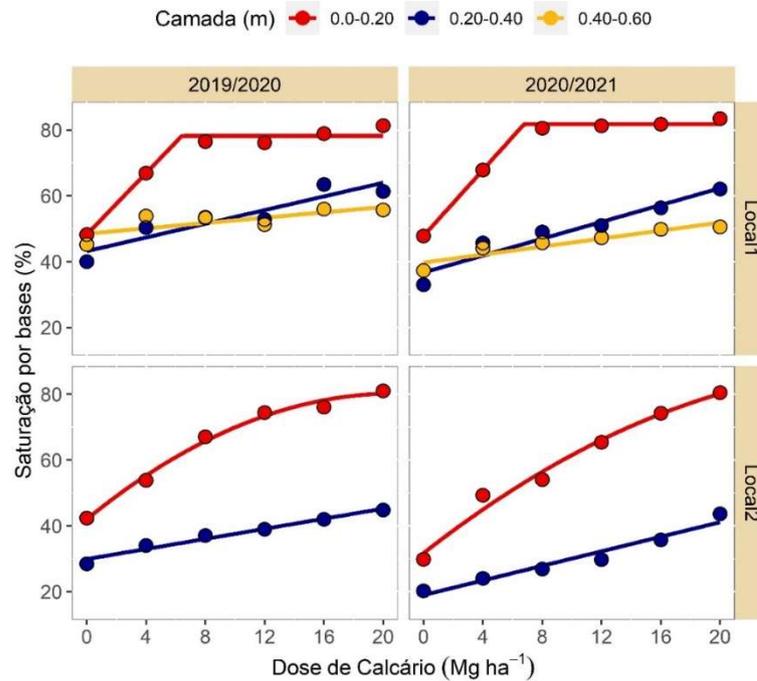


Fonte: Do autor (2021).

Para o Local2, os teores máximos de Mg na camada de 0,0-0,20 m ficaram próximos de  $2,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nos dois anos, ambos nas parcelas que receberam a maior dose. Nessas mesmas parcelas, também foi observado o teor máximo de Mg ( $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) para a camada de 0,20-0,40 m no segundo ano, no entanto, no primeiro ano, o teor máximo se manteve em  $0,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  com as doses a partir de  $8,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Com relação aos valores de V%, a partir das doses de  $6,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ , os valores máximos de V% ficaram próximos de 80% para a camada de 0,0-0,20 m do solo do Local1, nos dois anos. Os valores máximos de V% ficaram próximos de 63 e 54 % para as camadas de 0,20-0,40 m e de 0,40-0,60 m, respectivamente, com a dose de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Figura 10 – Valor de V% das profundidades de 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m no Local1 e nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m no Local2 em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).

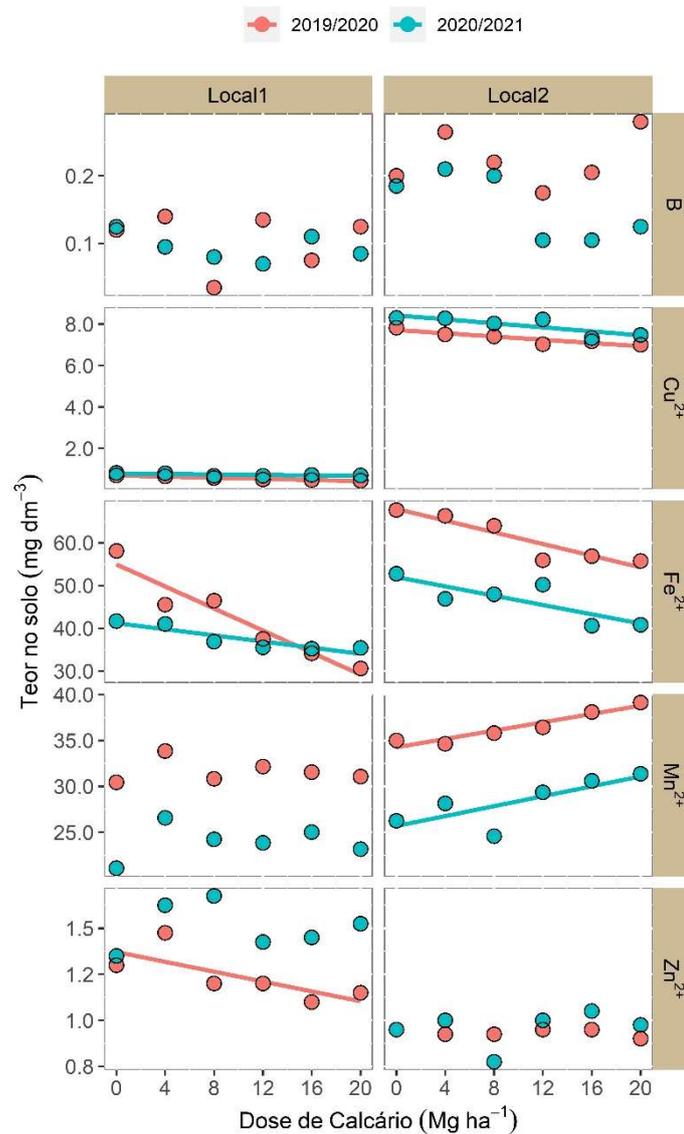


Fonte: Do autor (2021).

No Local2, a maior dose foi a que promoveu valores máximos de V% nas duas camadas e nos dois anos avaliados. Na camada de 0,0-0,20 m os valores máximos de V% praticamente não tiveram alterações de um ano para o outro, se mantendo em torno de 80%. Na camada de 0,20-0,40 m, os valores máximos de V% ficaram em torno de 43% nos dois anos.

Com relação aos teores de micronutrientes nos solos, não houve ajuste para os teores de B, indicando que o aumento das doses de calcário não resultou em variações significativas para esse nutriente. Para o  $\text{Cu}^{2+}$ , houve redução linear dos teores à medida que se aumentaram as doses, nos dois locais e nos dois anos de estudo. No Local1, no primeiro ano, o teor reduziu de 0,7 para 0,4  $\text{mg dm}^{-3}$ , comparando-se as parcelas sem aplicação de calcário, com aquelas que receberam a maior dose. Por outro lado, no segundo ano, a redução foi pequena, com teores variando de 0,8 para 0,7  $\text{mg dm}^{-3}$ , nas parcelas do tratamento controle para a dose de 20  $\text{Mg ha}^{-1}$ . No Local2, a redução foi de 7,7 para 6,9  $\text{mg dm}^{-3}$  e de 8,4 para 7,5  $\text{mg dm}^{-3}$  no primeiro e segundo ano respectivamente.

Figura 11 – Teores de micronutrientes nas profundidades de 0,0-0,20 m no Local1 e Local2, em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).



Fonte: Do autor (2021).

Os teores de Fe<sup>2+</sup>, também reduziram linearmente à medida que se aumentou as doses de calcário, nos dois anos e nos dois locais. Comparando o tratamento controle com o tratamento que recebeu a dose 20 Mg ha<sup>-1</sup>, observa-se que no Local1 os teores reduziram de 54,9 para 29,1 mg dm<sup>-3</sup> no primeiro ano e de 41,2 para 40,5 mg dm<sup>-3</sup> no segundo ano. No Local2 os teores foram de 67,9 para 54,2 mg dm<sup>-3</sup> e de 52,0 para 41,1 mg dm<sup>-3</sup> no primeiro e segundo ano, respectivamente.

Para o Mn<sup>2+</sup>, apenas os dados do Local2 obtiveram ajuste, no qual foi observado que os teores tiveram aumento com o incremento das doses, variando de 34,2 para 38,7 mg dm<sup>-3</sup> no

local sem aplicação de calcário para aquele que recebeu 20 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano. No segundo ano, a variação foi de 25,7 para 31,1 mg dm<sup>-3</sup>.

Para os modelos testados para o Zn<sup>2+</sup>, apenas o primeiro ano do Local1 obteve ajuste, tendo seu teor reduzido com o aumento das doses de calcário, variando de 1,4 a 1,1 mg dm<sup>-3</sup>, nas parcelas do tratamento sem aplicação de calcário, para aquele que recebeu a maior dose de calcário testada.

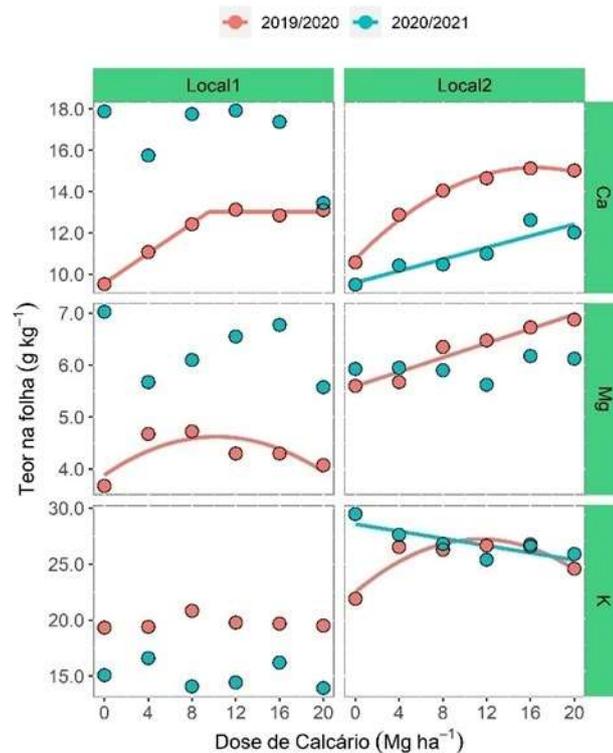
### **3.3 Efeito da aplicação das doses de calcário nos teores de nutrientes nas folhas da cultura da soja**

Foram avaliados os efeitos das doses crescentes de calcário nos teores de Ca, Mg, K e micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas da soja, durante o estágio R2 (florescimento pleno) nos locais 1 e 2. Inicialmente para o Ca, observou-se para o Local1 ajuste dos dados com os modelos testados apenas no primeiro ano de avaliação. Nesta primeira avaliação, a concentração máxima foi de 13,0 g kg<sup>-1</sup>, obtida a partir da dose de 9,6 Mg ha<sup>-1</sup>. No Local2, a concentração máxima de Ca nas folhas de soja no primeiro ano foi de 15,2 g kg<sup>-1</sup>, alcançada com a aplicação da dose de 16,4 g kg<sup>-1</sup> de calcário. No segundo ano, a concentração máxima de Ca foi de 12,4 g kg<sup>-1</sup>, promovida pela maior dose testada.

Para as concentrações de Mg nas folhas de soja, obteve-se ajuste apenas no primeiro ano de cultivo, com base nos modelos testados. No Local1, a dose de 10,2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário foi a que promoveu a máxima concentração de Mg, a qual foi de 4,6 g kg<sup>-1</sup>. Por sua vez, a concentração máxima nas folhas de soja, cultivada no Local2, foi de 7,0 g kg<sup>-1</sup>, com aplicação de 20 Mg ha<sup>-1</sup>.

Para o K, houve ajuste dos dados com os modelos testados para os dados apenas do Local2. No primeiro ano a concentração máxima foi de 27,2 g kg<sup>-1</sup>, promovida pela dose 11,4 Mg ha<sup>-1</sup>. No segundo ano de cultivo, a concentração de K reduziu com o aumento das doses de calcário, sendo que as maiores e menores concentrações foram 28,6 e 25,4 g kg<sup>-1</sup> nas folhas das plantas cultivadas sem aplicação de calcário e naquelas que receberam a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Figura 12 - Macronutrientes foliares de plantas de soja em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).

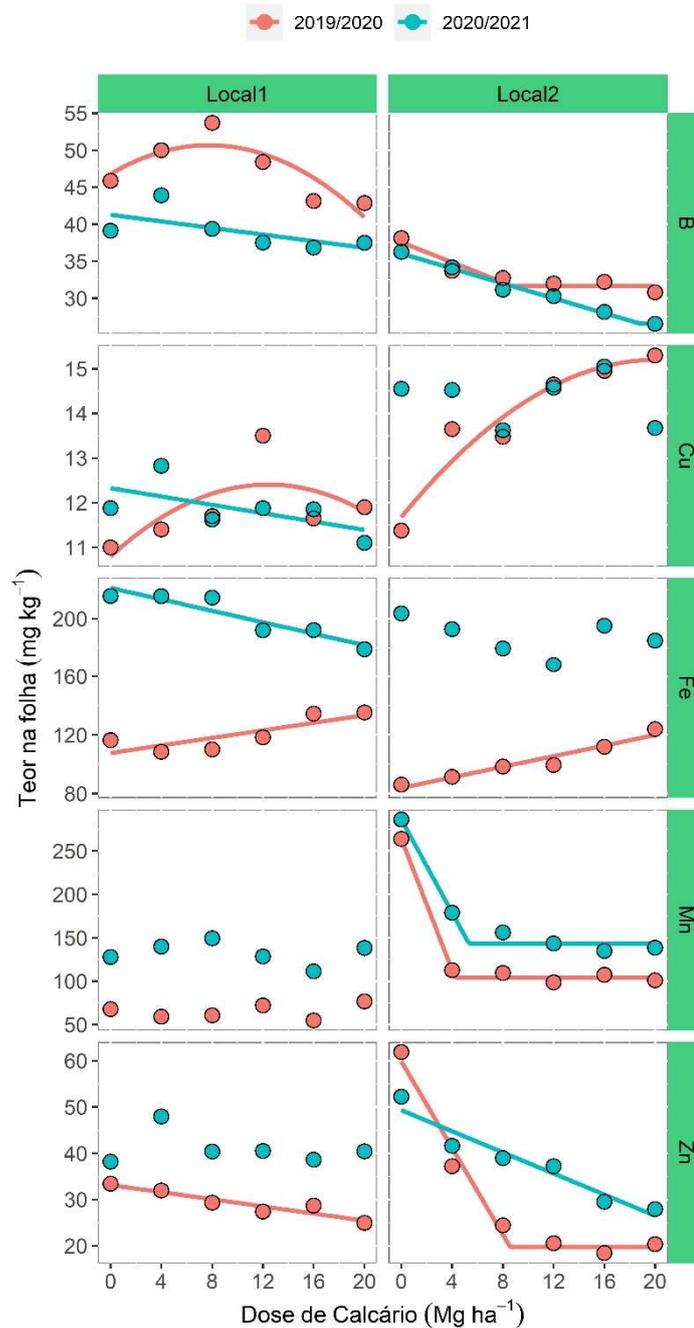


Fonte: Do autor (2021).

Para as concentrações de micronutrientes nas folhas de soja, inicialmente para o B, as concentrações variaram de 46,8 a 40,9 mg kg<sup>-1</sup>, nas plantas cultivadas sem aplicação de calcário para aquelas que receberam na maior dose, respectivamente, no primeiro ano de cultivo do Local1. No segundo ano, como no primeiro, a concentração mínima de B foi alcançada também pela dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. No Local2, no primeiro ano de cultivo, a concentração de B reduziu até a dose 8,7 Mg ha<sup>-1</sup>, permanecendo com teores de 31,7 mg kg<sup>-1</sup> até a dose máxima de calcário testada. No segundo ano as concentrações de B reduziram de 35,9 para 26,3 mg kg<sup>-1</sup>, comparando-se as plantas cultivadas no tratamento controle com aquelas cultivadas nas parcelas que receberam a maior na dose aplicada.

No caso da concentração de Cu, no local sem aplicação de calcário, ela foi de 10,8 mg kg<sup>-1</sup>, alcançando a concentração foliar máxima de 12,4 mg kg<sup>-1</sup> na dose 12,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário no Local1, no primeiro ano. No segundo ano, a maior concentração de Cu nas folhas foi de 12,3 mg kg<sup>-1</sup> no tratamento controle e reduziu para 11,4 mg kg<sup>-1</sup> na dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. No Local2, as concentrações foliares de Cu aumentaram de 11,7 para 15,2 mg kg<sup>-1</sup>, comparando-se o tratamento controle com aquele que recebeu a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, no primeiro ano. No entanto, no segundo ano de cultivo, não houve ajuste de acordo com os modelos testados.

Figura 13 – Micronutrientes nas folhas das plantas de soja em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020 e 2020/2021).



Fonte: Do autor (2021).

Com base nos modelos de ajuste para o micronutriente Fe, no Local1 no primeiro ano de cultivo, as concentrações foliares aumentaram conforme se aumentaram as doses de calcário, atingindo-se concentração máxima de  $133,4 \text{ mg kg}^{-1}$  nas parcelas que receberam a maior dose de calcário. No segundo ano, as concentrações foliares de Fe reduziram de  $221,0$  para  $181,9 \text{ mg kg}^{-1}$  nas plantas do tratamento controle para aquelas que receberam a máxima dose testada. No Local2, as concentrações foliares de Fe aumentaram de  $83,8 \text{ mg kg}^{-1}$  para  $119,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ,

comparando as plantas cultivadas no tratamento controle com aquelas que receberam a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Por sua vez, no segundo ano não houve ajuste com os modelos testados.

Para o Mn, de acordo com os modelos testados, não houve ajuste para as concentrações foliares para o Local1 em ambos os anos de cultivo. Para o Local2, as concentrações foliares de Mn reduziram de 264,0 mg kg<sup>-1</sup> no tratamento controle para 104,1 mg kg<sup>-1</sup> a partir da dose 4,2 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano. No segundo ano, as concentrações foliares reduziram de 286,3 mg kg<sup>-1</sup> nas plantas cultivadas sem calcário para 143,3 mg kg<sup>-1</sup> a partir da dose 5,3 Mg ha<sup>-1</sup>.

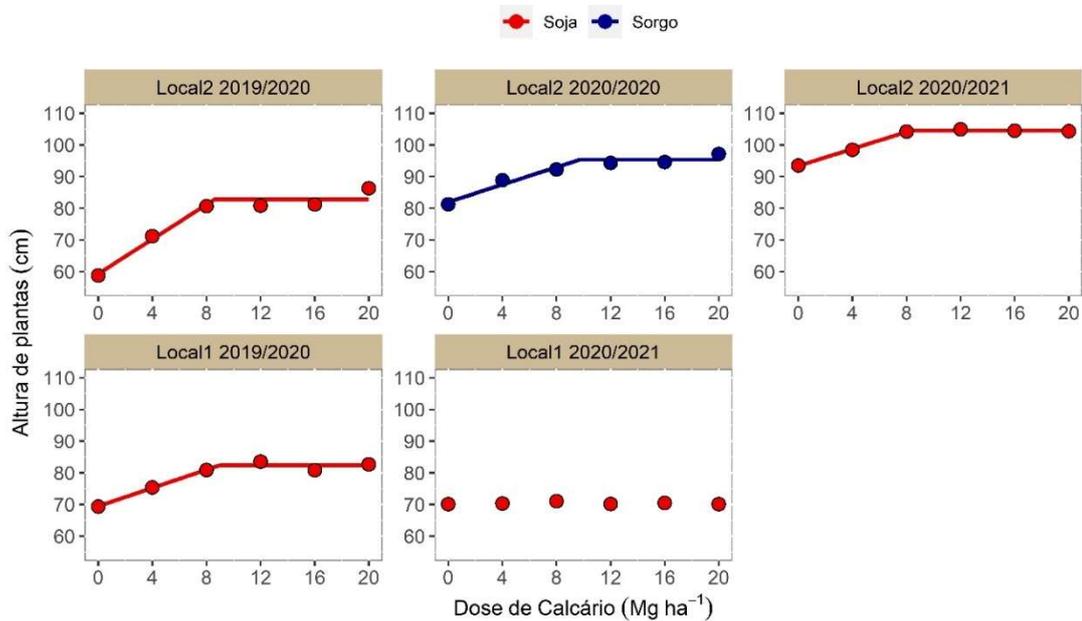
No caso do Zn, as concentrações variaram de 33,1 mg kg<sup>-1</sup> nas parcelas sem aplicação de calcário para 25,4 mg kg<sup>-1</sup> na maior dose testada no Local1, no primeiro ano. No segundo ano de cultivo não houve ajuste com base nos modelos testados. No Local2, no primeiro ano, as concentrações foliares de Zn reduziram de 59,9 mg kg<sup>-1</sup>, nas parcelas sem aplicação de calcário, para 19,8 mg kg<sup>-1</sup> a partir da dose 8,6 Mg ha<sup>-1</sup>. No segundo ano de cultivo, as concentrações foliares de Zn reduziram com o aumento das doses de calcário, de 49,3 para 26,5 mg kg<sup>-1</sup>, comparando as parcelas sem aplicação de corretivo com aquelas que receberam a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>.

### **3.4 Efeito da aplicação de calcário na altura e produtividade de grãos das culturas.**

O modelo platô foi o que apresentou melhor ajuste em todos os cultivos para altura de plantas, exceto para o segundo cultivo do Local1, o qual não obteve ajuste com os modelos testados. A dose que proporcionou a máxima altura de plantas foi semelhante, permanecendo dentro do intervalo de doses de calcário de 8,4 a 9,7 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo que a partir dessas doses, não foi observado alteração na altura de plantas.

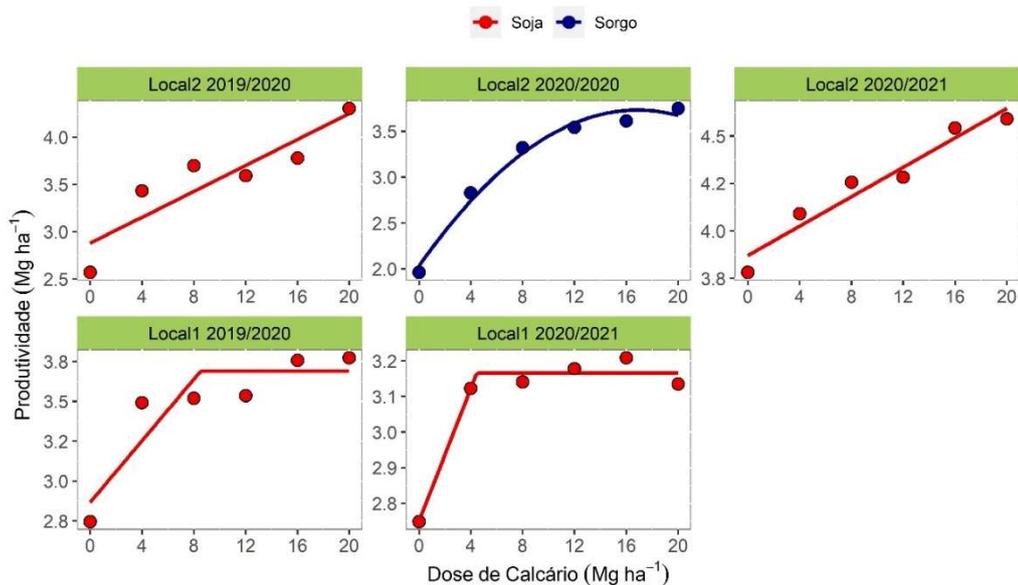
Para produtividade de grãos, os modelos variaram de acordo com os locais e, no Local2, variaram de acordo com a cultura. No Local1, o modelo platô foi o que apresentou o melhor ajuste em ambos os cultivos. No Local2, os modelos que apresentaram melhor ajuste foram o linear para a cultura da soja e, o quadrático, para a cultura do sorgo. No Local1, a máxima produtividade de soja foi alcançada a partir da dose 8,5 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro cultivo e a partir da dose 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> para o segundo cultivo.

Figura 14 – Altura de plantas da cultura da soja (Local1) e soja e sorgo (Local2), em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020, 2020/2020 e 2020/2021).



Fonte: Do autor (2021).

Figura 15 – Produtividade da cultura da soja (Local1) e soja e sorgo (Local2) em função das doses de calcário durante duas safras (2019/2020, 2020/2020 e 2020/2021).



Fonte: Do autor (2021).

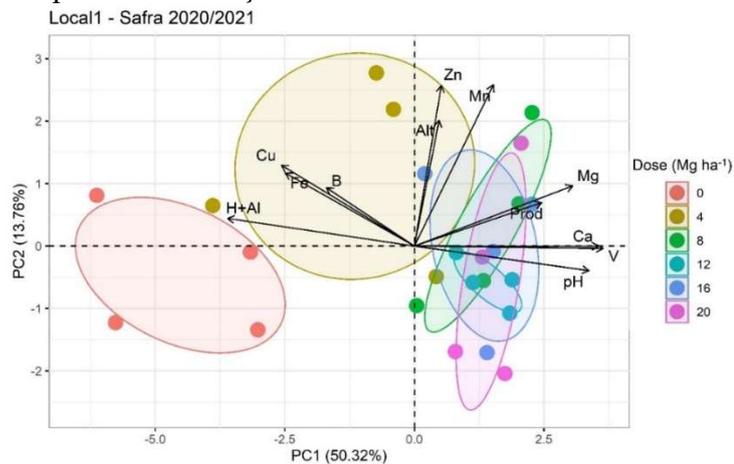
Nos cultivos do Local2, a produtividade máxima de soja foi alcançada com a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, com incrementos de 48 e 20% no primeiro e no segundo cultivo, respectivamente, comparado ao controle. No cultivo do sorgo, a dose 16,9 Mg ha<sup>-1</sup> foi a que promoveu a máxima

produtividade da cultura, atingindo nessa dose um incremento de 83% na produtividade em relação ao tratamento controle.

### 3.5 Análise de componentes principais (PCA)

De acordo com a PCA, para o Local1 no segundo ano de cultivo, as doses foram separadas em três grupos: dose 0, dose 4 e doses de 8 a 20  $\text{Mg ha}^{-1}$ , o que mostra que as doses acima de 8  $\text{Mg ha}^{-1}$  apresentaram efeitos similares sobre os atributos químicos do solo, altura de plantas e produtividade dos cultivos. As doses acima de 8  $\text{Mg ha}^{-1}$  proporcionaram os maiores valores de pH e V% e teores de Ca e Mg nos solos, além de maiores produtividades, e estas variáveis tiveram correlação positiva entre si. Os micronutrientes B, Cu e Fe apresentaram correlação negativa com o pH do solo, com maiores valores na dose de 4  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

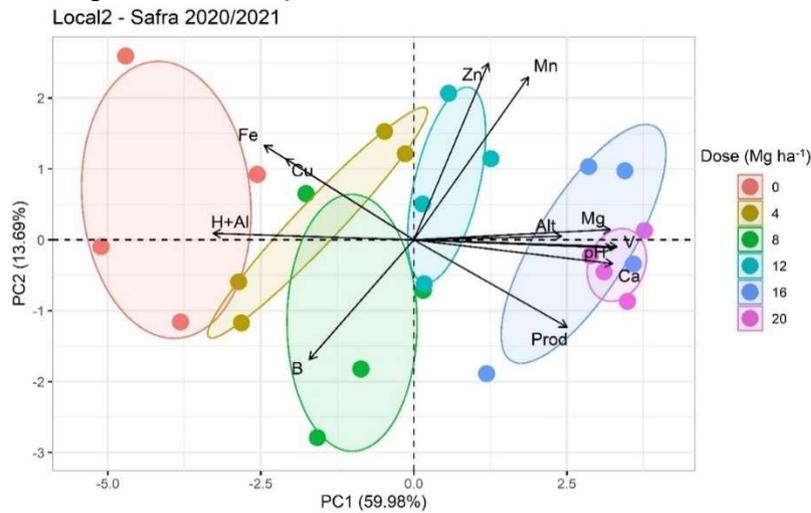
Figura 16 – PCA dos atributos químicos do solo da camada de 0,0-0,20 m, produtividade e altura de plantas em função das doses de calcário do Local1 da safra 2020/2021.



Fonte: Do autor (2021).

Para o Local2, a PCA mostrou que houve maiores diferenças entre os tratamentos, com exceção das doses 16 e 20  $\text{Mg ha}^{-1}$  que foram semelhantes e proporcionaram os maiores valores de pH e V% e teores de Ca, Mg nos solos, além de maiores alturas de plantas e produtividade das culturas, com correlação positiva entre si. Os teores dos micronutrientes Mn e Zn foram maiores, quando se utilizou a dose de 12  $\text{Mg ha}^{-1}$  e de B, com a aplicação da dose de 8  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Os teores dos micronutrientes Fe e Cu apresentaram correlação negativa com a produtividade.

Figura 17 – PCA dos atributos químicos do solo da camada de 0,0-0,20 m, produtividade e altura de plantas em função das doses de calcário do Local2 da safra 2020/2021.



Fonte: Do autor (2021).

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Atributos químicos do solo

Em ambos os locais estudados, o aumento nas doses de calcário proporcionou elevação do pH, V% e teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , tanto em condições controladas (incubação), quanto em condições de campo (FIGURAS 3, 5, 7, 8 e 9). Esse fato já esperado, pois o calcário promove a correção do solo, elevando os valores de pH e neutralizando os teores de Al trocável, além de aumentar os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no complexo de troca (cargas do solo utilizadas nos processos de troca iônica) (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007; RONQUIM, 2010; FARIA *et al.*, 2020). Desta forma, o calcário deve ser o primeiro produto a ser aplicado quando o objetivo é construir a fertilidade do solo, isso porque é a prática com menor custo e mais eficiente para elevar os teores de Ca e Mg do solo, neutralizar o Al e elevar o pH e a V% (FAGERIA; BALIGAR, 2008; KUNHIKRISHNAN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2019; SOUSA; LOBATO, 2004; RAIJ 2011b).

O método de incubação do solo tem como finalidade simular as condições naturais do solo em resposta a doses de calcário, assim possibilitando a determinação dos índices de acidez do solo em função das doses de calcário (QUAGGIO, 2000). De fato, o comportamento das variáveis estudadas em incubação assemelhou-se às obtidas nas condições de campo. Estes resultados evidenciam a acurácia do método de incubação do solo para determinação da quantidade de calcário a ser aplicada no solo.

Apesar do comportamento semelhante nos solos dos locais estudados, para os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no Local2 e H+Al, pH e V% no Local1, houve maior amplitude de variação em função das doses de calcário. Possivelmente, a maior CTC e MO do Local2 (TABELA 1) possibilitou maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em comparação ao Local1. Esses mesmos aspectos influenciaram o poder tampão do solo do Local2, resultando na necessidade de maiores doses de calcário para atingir os valores máximos (pH e V%) e mínimo (H+Al). A mudança de pH do solo depende do pH inicial, das entradas líquidas de substâncias de caráter ácido-alcalino e da capacidade de tamponamento do pH do solo (NELSON; SU, 2010). Ademais, o pH do solo influencia na disponibilidade de nutrientes e toxicidade de alumínio (JALALI; MORADI, 2020).

O poder tampão de um solo é uma propriedade intrínseca relacionada a sua capacidade de resistir a uma mudança no pH, sendo essencial para estimar a quantidade de calcário necessária para elevar o pH do solo a um nível desejado e para prever a taxa de acidificação do solo nos sistemas agrícolas (WANG *et al.*, 2015). Segundo Józefowska *et al.* (2019), os colóides do solo são o fator mais importante para determinar a capacidade tampão do solo, sendo que solos com uma grande quantidade de colóides têm alta capacidade tampão.

Além da capacidade de tamponamento de cada solo, que é dependente da textura do solo e teor de MO, a dose de calcário para adequada correção do solo e elevação dos teores de Ca e Mg e dos valores de pH e V% depende também das propriedades dos corretivos e da profundidade de incorporação (LI *et al.*, 2019). Este estudo confirma a grande influência da capacidade de tamponamento dos solos na determinação das doses de calcário, já que foram aplicados os mesmos corretivos nos dois locais. Isto porque no Local1, foi necessária uma dose de calcário aproximadamente três vezes menor do que no Local2, para se alcançar os mesmos valores de pH, V% e teores de Ca e Mg e H+Al na camada de 0,0-0,20 m. No Local2 foi necessária a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>.

No Local1, com a aplicação de doses acima de 12,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário foi possível atingir valores de  $\text{Ca}^{2+}$  considerados adequados para os solos de Minas Gerais (acima de 2,4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (ALVAREZ *et al.*, 1999). Como o calcário utilizado apresentava percentagens de PRNT e CaO de 100 e 32,8%, respectivamente, a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> de corretivo teria uma capacidade teórica de aumentar 11,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca na camada de 0,0-0,20 m ou 5,85 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca na camada de 0,0-0,40 m. Possivelmente não ocorreram aumentos tão significativos nos teores de Ca na camada de 0,0-0,20 m porque pode ter havido descida de parte do nutriente para camadas inferiores do solo.

No solo argiloso do Local2, quando aplicou a maior dose de corretivo ( $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) observaram-se teores de  $\text{Ca}^{2+}$  de  $4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no primeiro ano e  $4,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no segundo ano, considerados como níveis adequados para o desenvolvimento das culturas (ALVAREZ *et al.*, 1999). Se for considerado o valor de  $5,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de Ca como o máximo valor teórico e considerar os teores já existentes antes da aplicação do corretivo, pode-se dizer que cerca de 52% do corretivo reagiu no solo nos dois primeiros anos. O solo do Local1, por apresentar textura mais arenosa e baixo teor de MO, comparado ao solo do Local2, apresenta baixa CTC, portanto, sua capacidade de retenção de cátions é menor que o solo do Local2 (CARNEIRO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018). Ou seja, mesmo com a elevação das doses de calcário a níveis superiores aos estudados não seria possível atingir altos valores de  $\text{Ca}^{2+}$ , além de resultar na elevação do valor de pH a valores excessivos podendo ocasionar o problema da supercalagem (CARNEIRO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018).

Para o nutriente  $\text{Mg}^{2+}$ , a partir da dose de  $4,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  observaram níveis adequados no solo do Local1 ( $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) no primeiro ano de avaliação. No segundo ano, atingiu-se o teor de  $1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , com aplicação da dose de  $11,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Devido à maior capacidade de movimentação do  $\text{Mg}^{2+}$  no solo comparado ao  $\text{Ca}^{2+}$  (GRANSEE; FUHRS, 2013), principalmente em solos arenosos, como o do Local1 houve aumento dos teores do nutriente nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. O solo do Local2, por sua vez, já apresentava naturalmente teores adequados de Mg mesmo na ausência de calagem (FIGURA 3). Mas, foram atingidos teores considerados altos no solo ('muito bom'), de acordo com Alvarez *et al.* (1999).

Com relação aos valores de pH, foram observadas respostas distintas nas duas áreas, principalmente na camada de 0,0-0,20 m. No Local1, por ser um solo mais arenoso, com menor capacidade de tamponamento, observaram-se valores de pH acima de 7,0, com aplicação das maiores doses de calcário aplicadas. Por sua vez, no Local2, mesmo com aplicação da dose de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ , os valores máximos de pH ficaram próximos de 6,0 na camada de 0,0-0,20 m. Essa informação é de extrema importância quando se pensa na disponibilidade de micronutrientes, pois é conhecido na literatura, o efeito negativo dos altos valores de pH do solo na redução da disponibilidade de micronutrientes (MALAVOLTA, 1980; BARBER, 1995; RHOTON, 2000; MOREIRA *et al.*, 2006; FOLONI *et al.*, 2008; MOREIRA *et al.*, 2016; MOREIRA *et al.*, 2017), mostrando que devem se ter mais cuidados com as doses de calcário a serem utilizadas em solos com menor capacidade tampão.

A elevação do pH do solo para valores próximos de 7, indisponibiliza grande parte dos micronutrientes às plantas, devido a formação de compostos de baixa solubilidade

(MALAVOLTA, 1980; BARBER, 1995; RHOTON, 2000). De fato, as doses mais elevadas de calcário promoveram redução nos teores de Fe e Zn para o Local1 e Cu e Fe para o Local2 na camada de 0,0-0,20 m (FIGURA 10). No entanto, para o Local2, os níveis de Mn se elevaram de acordo com aumento das doses de calcário aplicado.

Apesar da redução dos teores de alguns micronutrientes do solo, quando se considera os níveis adequados para os solos do estado de Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), os teores de Cu, Fe, Mn e Zn estavam dentro desta faixa, mesmo quando foi aplicada a maior dose de calcário nos dois locais estudados. Além disso, a aplicação de micronutrientes no sulco de semeadura com o adubo de plantio, ou durante desenvolvimento da cultura, é uma prática comum adotada pelos produtores, o que pode favorecer o aumento da sua disponibilidade, mesmo em caso de redução da sua disponibilidade ocasionada pela aplicação excessiva de calcário.

Segundo Teixeira *et al.* (2020), a faixa de pH do solo em água entre 5,7 e 6,0 é considerada ideal para a maioria das culturas anuais no Brasil, porém, frequentemente as metodologias utilizadas na correção dos solos não são eficientes para elevar o pH para os valores desejados. De fato, foram necessárias altas doses de calcário, principalmente no Local2 para se alcançar valores adequados de pH.

Do ponto de vista do pH do solo na camada 0,20-0,40 m, o Local1 apresentou maior resposta em função das doses de calcário aplicadas, em comparação ao Local2 (FIGURA 5). Possivelmente, esse comportamento é devido a maior capacidade tampão do solo do Local2, comparado ao solo do Local1, conforme já abordado. Outra possibilidade é que a profundidade de incorporação de 0,40 m do corretivo não foi efetivamente alcançada. Corroborando com essa hipótese, Prado e Roque (2002) avaliando métodos de incorporação de calcário, observaram que mesmo utilizando grade com discos de 36 polegadas de diâmetro, maior do que a utilizada no presente estudo (32 polegadas), o corretivo promoveu alterações efetivas apenas na camada 0,0-0,30 m de profundidade. Já Fageria e Baligar (2008), salientam que fatores ambientais podem também influenciar na eficiência da correção do solo em camadas mais profundas, pois a temperatura e umidade do solo diferem nessas camadas e interferem diretamente na reação do calcário. Outro fator relevante refere-se a textura do solo, pois em solos com textura mais arenosa ou com maior presença de macroporos, pode ocorrer a movimentação no perfil do solo de partículas finas de calcário que não reagiu na superfície, o que pode explicar o efeito na neutralização da acidez e na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em profundidade (AMARAL *et al.*, 2004).

Com relação à efetividade dos modelos testados, corroborando com diversos autores, os comportamentos linear e quadrático apresentaram-se mais adequados para maioria das variáveis estudadas (FAGERIA, 2001; FAGERIA; BALIGAR, 2008; CRUSCIOL *et al.*, 2016; ESPER NETO *et al.*, 2019). No comportamento linear, variáveis como teor de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e pH para o Local2 (camada 0,0-0,20 m) demonstraram que haveria possibilidade de aumento dos níveis dos nutrientes, caso fossem aplicadas maiores quantidades de calcário do que a aplicada. Por sua vez, as mesmas variáveis para o Local1, demonstraram que as doses testadas foram suficientes para determinar a máxima resposta. Esse fato deve estar relacionado com a maior capacidade de retenção de nutrientes em solos com maiores teores de argila e MO do solo, conseqüentemente maior capacidade de troca catiônica como é o caso do Local2 em comparação ao Local1.

Por outro lado, foi observado comportamento platô para algumas variáveis em determinados locais e profundidades. Este modelo é eficiente na identificação da dose a partir da qual não há alteração na variável avaliada. Por exemplo, para o pH do solo do Local1 (camada 0,0-0,20 m) durante a safra 20/21, houve aumento do pH do solo (6,4) até a dose de  $8,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ , sendo que maiores doses (até  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) não foram capazes de elevar o pH. Vários fatores podem influenciar no modelo que apresenta melhor ajuste, como a fertilidade inicial do solo, características do corretivo, a dose aplicada e tipo de solo (ESPER NETO *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019). Além disso, poucos estudos utilizaram modelo platô e, menos ainda com doses de calcário. Este modelo permite estimar a diminuição do efeito do calcário ocasionado pela sua aplicação em excesso (REZENDE *et al.*, 2007), ou seja, o ponto a partir do qual o aumento na dose não promove alteração significativa no atributo avaliado.

O aumento das doses de calcário promoveu elevação da V% nos dois locais estudados (FIGURA 9). Para a maioria dos sistemas produtivos, é interessante que a V% seja relativamente elevada (CARNEIRO *et al.*, 2018), pois ela está relacionada com a disponibilidade de bases às plantas (NDUWUMUREMYI *et al.*, 2013). No entanto, valores muito altos devem ser evitados, uma vez que elevação da V% pela aplicação de altas doses de calcário, está relacionada com a elevação do pH para faixas nas quais reduziria a disponibilidade de nutrientes (CARNEIRO *et al.*, 2018), principalmente os micronutrientes, conforme já discutido.

Deve ser considerado, no entanto, que em solos com CTC muito baixa, como é o caso do solo do Local1 é necessário o aumento da V% para valores acima dos comumente recomendados para solos argilosos (50 a 60%), visando o fornecimento de Ca e Mg pelo menos

a teores próximos dos valores críticos. Neste sentido é que muitos autores recomendam que se atinjam nestes solos teores de Ca e Mg, pelo menos de 1,5 e 0,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente (ZANCANARO *et al.*, 2018).

#### 4.2 Teores de nutrientes nas folhas da soja

A diagnose foliar possibilita identificar a deficiência ou excesso de determinado nutriente, antes que sintomas visuais possam ser observados (CÂMARA, 2015). Assim, esta prática possibilita um ajuste ou correção na adubação e contribui para ajustes na próxima safra. Nos resultados foi identificado que os teores dos macronutrientes Ca e Mg apresentaram incrementos de acordo com aumento das doses de calcário aplicadas, com redução dos teores de K na segunda safra.

A calagem promoveu aumento de os teores foliares de Ca e Mg (FIGURA 11), confirmando que o calcário é uma fonte eficiente destes nutrientes para as culturas (RATKE *et al.*, 2018; DEUS *et al.*, 2020; SCHENFERT *et al.*, 2020). No caso do K, as concentrações foliares reduziram com o aumento das doses de corretivo, durante a safra 2020/2021. Esse comportamento do K durante as safras mencionadas, se assemelham aos resultados de Moreira *et al.* (2016) que, ao comparar dois níveis de saturação por bases (40 e 70%), observaram redução nos níveis foliares do nutriente quando na maior saturação por bases. A redução nos teores foliares de K pode estar relacionada a sua lixiviação no perfil do solo, ocasionada pelo excesso de Ca e Mg, que o desloca para solução do solo em função da maior força de retenção do Ca e Mg aos coloides, comparado ao K (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008). Além disso, o excesso de Ca e Mg pode reduzir a absorção de K pelas raízes das plantas (OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001).

Com relação às concentrações de micronutrientes nas folhas, houve redução de B, Mn e Zn, com aumento das doses de calcário (FIGURA 12). No caso dos teores de Mn, os resultados diferem da situação observada no solo do Local1 (FIGURA 10), pois apesar de ter ocorrido uma maior disponibilidade de Mn no solo com aumento das doses, isto não resultou em uma maior absorção pelas plantas. Possivelmente o extrator Mehlich 1 utilizado não foi eficiente em detectar apenas as formas disponíveis de Mn às plantas (Mn<sup>2+</sup>), pois este nutriente passa constantemente por diversas reações de oxirredução, em função das propriedades do solo (químicas e físicas) e fatores edáficos (umidade, temperatura, aeração e outros), fazendo com que haja grandes variações nos teores das diferentes formas de Mn no solo, como Mn<sup>2+</sup>; Mn<sup>3+</sup>

e  $Mn^{4+}$  (DECHEN; NACHTIGALL, 2007; MOREIRA *et al.*, 2016; MELLO, 2019). Moreira *et al.* (2016) verificaram que não houve uma correlação significativa entre os teores de Mn no solo, avaliados por diversos extratores, com as concentrações nas folhas das plantas de soja, e em alguns casos houve uma correlação negativa, confirmando os resultados aqui encontrados. Isso por que principalmente em solos com altos teores de MO, boa parte do Mn pode estar ligado à MO e não disponível às plantas (MOREIRA *et al.*, 2006).

Semelhante aos resultados do presente trabalho, Fonseca, Caires e Barth (2010) observaram que o aumento das doses de calcário diminuiu o teor de Mn em folhas de trigo, mas sem alterar os teores foliares de Cu, Fe e Zn. Moreira *et al.* (2017) também não observaram redução da disponibilidade de micronutrientes para soja (teores no solo e folhas de soja), em função de doses de calcário, bem como tempo de cultivo em SPD, indicando que as doses de calcário atualmente empregadas, não necessariamente conduzem a deficiência de micronutrientes. Em estudos com aveia preta em Latossolo, Soratto e Crusciol (2008) não observaram diminuições nos teores foliares de Mn, Fe e Zn quando aplicadas doses de 4,3 Mg ha<sup>-1</sup> na superfície. Por sua vez, Caires *et al.* (2003) verificaram reduções na absorção de Mn e Zn apenas em parte das safras de soja avaliadas, com aplicação de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> na superfície, sem incorporação.

Ressalta-se que, independentemente dos tratamentos, as concentrações dos macronutrientes Ca, Mg e K nas folhas se apresentaram sempre acima dos níveis críticos descritos por Martinez, Carvalho e Souza (1999) e Câmara (2015). No caso dos micronutrientes, mesmo com a redução das concentrações provocadas pelo aumento das doses de calcário aplicadas, as concentrações nas folhas foram iguais ou superiores aos valores considerados adequados (MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999; CÂMARA, 2015). Esse comportamento é um indicativo de que, mesmo quando doses consideradas elevadas de calcário são aplicadas, a demanda da planta por micronutrientes é atendida. Em plantas de soja, é comum a aplicação de micronutrientes durante o desenvolvimento da cultura (EMBRAPA, 2020), podendo essa aplicação atender parte da demanda nutricional da planta.

#### **4.3 Altura das plantas e produtividade das culturas em função das doses de calcário**

O aumento das doses de calcário geralmente promoveu incrementos na altura de plantas (FIGURA 13), conforme já observado por outros autores (MORAES, 2019; WIJANARKO; TAUFIQ, 2016). Isso ocorreu, possivelmente porque houve aumento dos teores de Ca nas

folhas de soja, com aumento das doses de calcário (FIGURA 11). Este nutriente, além de integrar a parede celular, atua na alongação e divisão celular de plantas de soja (CÂMARA, 2015), assim, tendo relação direta com a altura de plantas. Deve-se considerar também que a calagem promove a elevação do pH dos solos (BAQUY *et al.*, 2018) e, conseqüentemente, aumenta a disponibilidade da maioria dos nutrientes, além de neutralizar elementos tóxicos como o Al e Mn às plantas, proporcionando melhoria dos aspectos físicos, químicos e biológicos dos solos, os quais proporcionam maior desenvolvimento das plantas (FAGERIA; BALIGAR, 2008; KUNHIKRISHNAN *et al.*, 2016; LI *et al.* 2019).

Houve incremento de produtividade dos cultivos em resposta às doses de calcário, como já visto em diversos trabalhos (BARBIERI *et al.*, 2015; MALLARINO, 2015; LI *et al.*, 2019; MORAES, 2019; MOREIRA; MORAES, 2018; RESENDE *et al.*, 2016; VERONESE, 2011). Respostas das culturas a doses crescentes de calcário em solos ácidos e pobres em nutrientes são esperadas, mas no presente estudo houve altas respostas mesmo para o Local1 (solo com baixa capacidade tampão) e V% inicial de quase 50% na camada de 0,0-0,20 m, com doses bem acima daquelas que seriam oficialmente recomendadas.

Com base nas análises de componentes principais (PCA) do Local1, realizada com os dados das avaliações do segundo ano de cultivo, os atributos químicos do solo pH, V%, Ca e Mg agruparam-se juntamente com a produtividade, próximos às maiores doses testadas, indicando que essas doses promoveram melhorias desses atributos e da produtividade, com correlação positiva entre estas variáveis. Notou-se que as doses acima de 8 Mg ha<sup>-1</sup> proporcionaram os maiores valores de pH e V% e teores de Ca e Mg nos solos, além de maiores produtividades e altura de plantas.

Com base no PCA também se observou que para o Local2, houve maiores diferenças entre os tratamentos, com exceção das doses 16 e 20 Mg ha<sup>-1</sup> que foram semelhantes e proporcionaram os maiores valores de pH e V% e teores de Ca, Mg nos solos, além de maiores alturas de plantas e produtividade das culturas, com correlação positiva entre si. Em ambos os locais e anos de cultivos, a V% da camada superficial que promoveu a máxima produtividade da soja permaneceu na faixa de 70 a 80%. A V% considerada ideal para a cultura da soja pelos métodos mais utilizados para recomendação de calagem no Brasil central são de 50% (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015) e 60% (RAIJ *et al.*, 1997). Em experimento realizado recentemente por Esper Neto *et al.* (2019) em um solo com a mesma classe textural do solo do Local1, a dose que promoveu a máxima produtividade da soja

foi de 4,6 Mg ha<sup>-1</sup> e V% de 76 (0,0-0,20 m), valores bem semelhantes aos encontrados neste trabalho.

As doses calculadas pelo Método da Saturação de Bases (BSAT) (RAIJ *et al.*, 1997) e Método da Neutralização da acidez trocável e incremento de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> (MG5A) (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999), considerando os resultados da análise de solo da camada de 0,0-0,20 m, antes da implantação dos experimentos, seriam de 0,3 Mg ha<sup>-1</sup> (MG5A) e 1,1 Mg ha<sup>-1</sup> (BSAT) para o Local1 e 0 Mg ha<sup>-1</sup> (MG5A) e 3,7 Mg ha<sup>-1</sup> (BSAT) para o Local2, calculados para a camada de 0,0-0,20 m, com correção do fator profundidade (2) para a camada de 0,0-0,40 m. Com base nos resultados, em ambos os locais avaliados, as maiores produtividades de soja e sorgo foram obtidas com aplicação de doses superiores às doses calculadas com base nos métodos oficiais.

Deve ser lembrado que no PCA os micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn agruparam-se próximo às menores doses testadas, mostrando o efeito das maiores doses de calcário na redução dos teores desses micronutrientes. No Local2, doses de calcário parecem ter influenciado negativamente apenas os teores de Fe e Cu. No entanto, novamente a produtividade agrupou-se juntamente com pH, V%, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>.

Apesar da variedade de métodos disponíveis para recomendação de calagem, as incertezas sobre a sua eficiência têm sido constantemente relatadas (TEIXEIRA *et al.*, 2020). Rodrigues *et al.* (2020) afirmam que o cálculo da necessidade de calcário utilizando-se de valores de V% desejados acima daqueles comumente recomendados pelos manuais estaduais pode favorecer um maior desenvolvimento e produtividade das culturas. Possivelmente, essa afirmação é devido ao fato de que, em muitas situações, para atingir os valores de V% ideais para as culturas devem ser utilizadas doses acima das obtidas com os valores calculados. No entanto, deve-se buscar entender os mecanismos responsáveis por estas discrepâncias entre as doses calculadas e as responsáveis pelas máximas produtividades, a fim de se evitar problemas com sub ou superdoses de calcário no campo.

De forma semelhante ao observado no presente estudo, Moraes (2019) também observou a necessidade de doses de calcário acima das recomendadas pela metodologia oficial para se obter as maiores produtividades das culturas. A produtividade máxima foi alcançada com as doses de 9,4 e 15,0 Mg ha<sup>-1</sup>, as quais proporcionaram V% de 70 e 80% respectivamente em dois solos com 54 e 46% de argila. No trabalho de Fageria (2001), avaliando as mesmas doses de calcário avaliadas neste trabalho, em Latossolo com 33% de argila, verificou que a dose de 17,3 Mg ha<sup>-1</sup> foi a que promoveu a máxima produtividade da soja. Grande parte dos estudos envolvendo doses elevadas de calcário em experimentos de campo, incorporaram o

corretivo apenas na camada mais superficial do solo (0,0-0,20 m) (FAGERIA, 2001; FAGERIA; E STONE, 2004; MOREIRA *et al.*, 2015). Porém, a incorporação do corretivo nas camadas mais profundas se torna uma estratégia fundamental para tornar os ambientes produtivos mais resilientes ao estresse hídrico. Raji (2011b) destaca a importância do aumento do volume de solo explorado pelas raízes das plantas cultivadas em sequeiro, os quais, em períodos de déficit hídrico, podem oferecer limitações na absorção de água e nutrientes caso não haja o aprofundamento do sistema radicular. Ainda ressalta que o excesso de acidez e alumínio, bem como a deficiência de cálcio são fatores que promovem o impedimento do desenvolvimento das raízes.

O estudo de Joris *et al.* (2013) identificou que o desenvolvimento radicular, a produção de biomassa da parte aérea, absorção de nutrientes e rendimento dos grãos da soja são reduzidos pela acidez do solo. A inibição do alongamento da raiz é o principal sintoma da interferência do  $Al^{3+}$  na divisão celular das raízes, inibindo a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente reduzindo o rendimento da cultura (BAQUY *et al.*, 2018).

De fato, as plantas cultivadas respondem em desenvolvimento e, conseqüentemente, em produtividade quando há boa disponibilidade de água. No entanto, algumas culturas possuem maior resistência ao déficit hídrico, como por exemplo a cultura do sorgo. De acordo com Sans, Morais e Guimarães (2003) a demanda de água pela cultura do sorgo durante seu ciclo varia entre 380 e 600 mm. Com base nos dados de pluviosidade deste trabalho (FIGURA 2), nos meses em que foi cultivado o sorgo (março a julho de 2020) o acumulado foi de apenas 235 mm, ainda assim se alcançou produtividade máxima de  $3,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , quantidade acima da média nacional para a mesma safra, que foi de  $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  (CONAB (2021)). Com base no modelo de ajuste, a produtividade máxima do sorgo foi promovida pela dose de  $16,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  e V% de 78,8%, o que reforça a importância da adequada correção do solo.

Sumarizando os resultados, as doses de calcário que promoveram a máxima produtividade da soja no Local1, proporcionaram, na camada de 0,0-0,20 m, valores de pH ( $CaCl_2$ ) na faixa de 5,6 a 6,4; V% na faixa de 70 a 80 % e participação de H+Al, Ca e Mg na CTC potencial de 23 a 30%, 40 a 50% e 24 a 26%, respectivamente. No entanto a produtividade máxima se manteve mesmo quando se atingiu pH ( $CaCl_2$ ) de 7,4, V% de 82 e participação de H+Al, Ca e Mg na CTC potencial de 18, 70 e 28%, respectivamente. No Local2 as doses que promoveram a máxima produtividade, incrementaram os valores de pH ( $CaCl_2$ ) para a faixa de 5,8 a 6,2, V% de 79 a 80% e participação de H+Al, Ca e Mg na CTC potencial de 14 a 20%,

48 a 50% e 28 a 30%, respectivamente. No estudo de Fageria *et al.* (2013), os valores ideais para o cultivo da soja também se encontram dentro dessas faixas.

Com base nos resultados de produtividade, com ganhos expressivos com doses bem superiores às recomendadas pelos métodos oficiais, sugere-se que, enquanto não houver uma possível revisão dos métodos de recomendação, as determinações de doses sejam realizadas baseando-se na participação de Ca e Mg na CTC potencial. Dessa forma, em áreas de abertura para produção de grãos, sugere-se que a dose de calcário seja calculada pensando na participação de Ca e Mg na CTC potencial na faixa de 40 a 60% e 15 a 20%, respectivamente, buscando alcançar a participação de Ca+Mg na CTC potencial de cerca de 70 %, conforme sugerido por Moreira e Moraes (2018).

## 5 CONCLUSÕES

A incorporação profunda de calcário promoveu aumento dos valores de pH e V%, neutralização da acidez e aumento dos teores de Ca e Mg nas camadas de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m nos dois locais de estudo e na camada de 0,40-0,60 m no Local1.

A recomendação e incorporação profunda de calcário, com doses acima das recomendadas pelos métodos da Saturação de Bases (BSAT) e Neutralização da acidez trocável e incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (MG5A), promoveu aumentos significativos nas produtividades de soja e sorgo.

As concentrações de Cu, Fe, Mn, Zn e Fe nas folhas de soja reduziram com a utilização das maiores doses de calcário, mas permaneceram geralmente próximas ou acima do nível crítico

As máximas produtividades no Local1, com solo franco-arenoso, foram promovidas por doses próximas a  $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  e valores médios de pH, V% e participação de H+Al, Ca e Mg na CTC potencial de 6, 75%, 26%, 45% e 25% respectivamente e no Local2, as máximas produtividades foram promovidas por doses próximas a  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  e valores médios de pH, V% e participação de H+Al, Ca e Mg na CTC potencial de 6, 80%, 17%, 49% e 29% respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solo. *In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.* Viçosa, 1999. v. 5, p. 314-316.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no Perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 28, p. 359-367, 2004.
- BAQUY, M. A. A.; LI, J. Y.; SHI, R. Y.; KAMRAN, M. A.; XU, R. K. Higher cation exchange capacity determined lower critical soil pH and higher Al concentration for soybean. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v. 25, p. 6980–6989, 2018.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. p. 414.
- BARBIERI, P. A.; ECHEVERRÍA, H. E.; ROZAS, H. R. S.; MARTÍNEZ, J. P. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 152, p. 29–38, 2015.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 35, n. 7, p. 1317-1324, 2000.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.
- CÂMARA, G. S. Adubação. *In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Soja: do plantio a colheita.* Viçosa: UFV, 2015.
- CARNEIRO, J. S. S.; SOUSA, S. A.; NIKKEL, M.; DEUSDARÁ, T. T.; MACHADO, A. F.; SILVA, R. R. Supercalagem: alterações em atributos químicos de um Latossolo vermelho-amarelo distrófico. **Revista de Ciências Agroambientais**, [s.l.], v. 16, n. 1, p. 31-38, 2018.
- CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **Pubvet**, [s.l.], v. 11, p. 947-1073, 2017.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grão.** Brasília: CONAB, 2021.
- CRUSCIOL, C. A.; ARTIGIANI, A. C.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. Soilfertility, plantnutrition, andgrainyiel dofupland rice affectedby surface applicationof lime, silicate, andphosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, Amsterdam, v. 137, p. 87-99, 2016.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ-V, V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T.; GUPPY, C. N.; SANTOS, S. M. C.; MOREIRA, L. L. Q. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 196, p. 104422, 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de Produção de Soja**. Sistemas de Produção 17. Londrina: Embrapa Soja, 2020.

ESPER NETO, M.; CONEGLIAN, C. F.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Short-term effects of liming on chemical attributes of tropical sandy soil and soybean (*Glycine max L.*) yield. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 13, n. 6, p. 889-894, 2019.

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

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; CASTRO, C.; MORAES, M. F. Optimal acidity indices for soybean production in Brazilian Oxisols, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v. 44, n. 20, p. 2941-2951, 2013.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, [s.l.], v. 99, p. 345-399, 2008.

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

FARIA, A. J. G.; MACHADO, A. F.; LUCENA, G. N.; NEGREIROS NETO, J. V.; CARNEIRO, J. S. S.; LEITE, R. C.; SILVA, R. R. Potential of limestone tailings for correction and fertilization of an Oxisol in the Brazilian Savanna. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v. 51, n. 8, p. 1024-1035, 2020.

FOLONI, J. S. S.; SANTOS, D. H.; CERESTE, E. J.; SALVADOR, J. P. Resposta do feijoeiro e fertilidade do solo em função de altas doses de calcário em interação com a gessagem. **Colloquium Agrariae**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.27-35, 2008.

FONSECA, A. F.; 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**, [s.l.], v. 67, n. 1, p. 60–70, 2010.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, [s.l.], v. 368, n. 1, p. 5-21, 2013.

- JALALI, M.; MORADI, A. Measuring and simulating pH buffer capacity of calcareous soils using empirical and mechanistic models. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s.l.], v. 66, n. 4, p. 559-571, 2020.
- JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, [s.l.], v. 365, p. 409–424, 2013.
- JÓZEFOWSKA, A.; SOKOŁOWSKA, J.; WOZNICA, K.; WOS, B.; PIETRZYKOWSKI, M. Tree species and soil substrate affect buffer capacity of anthroposols in afforested postmine sites in Poland. **Journal of Soil and Water Conservation**, [s.l.], v. 74, p. 4, n. 372-379, 2019.
- KÖPPEN, W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. **Geographische Zeitschrift**, [s.l.], v. 6, n. 11, p. 593-611, 1900.
- KUNHIKRISHNAN, A.; THANGARAJAN, R.; BOLAN, N.; XU, Y.; MANDAL, S.; GLEESON, D.; SESHADRI, B.; ZAMAN, M.; BARTON, L.; TANG, C. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. **Advances in Agronomy**, [s.l.], v. 139, p. 1-71, 2016.
- LI, Y.; CUI, S.; CHANG, S. X.; ZHANG, Q. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, [s.l.], v. 19, p. 1393–1406, 2019.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C. OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.
- MALLARINO, A. P. **Starter Fertilization Sometimes Boosts Corn Yield**. 20 de março de 2015. Disponível em: <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2015/03/starter-fertilization-sometimes-boosts-corn-yield2015>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. *In*: **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**, 1999. v. 5, p. 143-168.
- MELLO, G. **Dinâmica da disponibilidade de manganês no solo: influência de propriedades físicas, químicas e microbiológicas**. 2019. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.
- MORAES, F. A. de. **Doses de calcário na construção da fertilidade do perfil do solo**. 2019. 66 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2019.

MOREIRA, A.; SFREDO, G. J.; MORAES, L. A. C.; FAGERIA, N. K. Lime and cattle manure in soil fertility and soybean grain yield cultivated in tropical soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, p. 1157–1169, 2015.

MOREIRA, S. G.; MORAES, F. A. Construção da Fertilidade do Solo para o Sistema de Produção de Culturas Anuais. *In*: PAES, M. C.; VON PINHO, R. G.; MOREIRA, S. G. (Org.). Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil. 21. ed. Sete Lagoas: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2018. 4. **Anais [...]**. v. 32, p. 347383, 2018.

MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; KIEHL, J. D. C.; MARTIN NETO, L.; PAULETTI, V. Chemical forms in soils and bioavailability of manganese to soybean under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 30, n. 1, p. 121-136, 2006.

MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; KIEHL, J. de C.; PAULETTI, V.; MARTIN NETO, L. Chemical forms in soil and availability of manganese and zinc to soybean in soil under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 163, p. 41-53, 2016.

MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V.; SILVA, B. M.; KIEHL, J. C.; SILVA, C. G. M. Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. **Acta Scientiarum-Agronomy**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 89-97, 2017.

MOREIRA, S. G. Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. **Informações Agrônomicas**, [s.l.], n. 4, p. 1–12, 2019.

NATALE, W., ROZANE, D. E., PARENT, L. E., PARENT, S. É. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], p. 1294-1306, 2012.

NDUWUMUREMYI, A.; RUGANZU, V.; MUGWE, J. N.; RUSANGANWA, A. C. Effects of unburned lime on soil pH and base cations in acidic soil. **International Scholarly Research Notices**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], 2013.

NELSON, P. N.; SU, N. Soil pH buffering capacity: a descriptive function and its application to some acidic tropical soils. **Soil Research**, [s.l.], v. 48, n. 3, p. 201-207, 2010.

OLIVEIRA, F. A. D.; CARMELLO, Q. A. D. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 58, p. 329-335, 2001.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G. Uso alternativo da grade aradora superpesada na correção da acidez do solo em profundidade e na produção da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 275-281, 2002.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2000. p. 111.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria, 2019.

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

RAIJ, B. V. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. **Informações Agronômicas** **135**, set. 2011b.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC & Fundação IAC (Boletim Técnico), 1997. 285 p.

RATKE, R. F.; PEREIRA, H. S.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; BARBOSA, J. M.; LOPES, L. O. Different limestone particle sizes for soil acidity correction, Ca and Mg supply and corn yield. **Comunicata Scientiae**, [s.l.], v. 9, n.2, p. 175-184, 2018.

RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C. dos; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, [s.l.], n. 156, p.1-19, 2016.

REZENDE, D. M. L. C.; MUNIZ, J. A.; FERREIRA, D. F.; SILVA, F. F.; AQUINO, L. H. Ajuste de modelos de platô de resposta para a exigência de zinco em frangos de corte. **Ciência & Agrotecnologia**, [s.l.], v. 31, n. 2, p. 468-478, 2007.

RHOTON, F. E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 700-709, 2000.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 359.

RODRIGUES, H. V. M.; LEITE, R. C.; FREITAS, G. A. de; OLIVEIRA, I. M.; LIMA, S. O. Aspectos produtivos do capim marandu submetido a adubação fosfatada em níveis de saturação por bases. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, [s.l.], v. 10, p. 25-32, 2020.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Embrapa Territorial-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2010.

SANS, L. M. A.; MORAIS, A. V. C.; GUIMARÃES, D. P. **Época de plantio de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5th ed. Embrapa Solos. Brasília, DF, 2018.

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

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio a colheita**. Viçosa: UFV. 2015. p. 333.

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

SILVA, R. R.; CARNEIRO, J. S. S.; LUCENA, G. N.; NEGREIROS NETO, J. V. Supercalagem nos atributos de um Latossolo de textura média. **Revista Tecnologia e Ciência Agropecuária**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 53-58, 2018.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez e Correção do Solo. In: NOVAIS, R. F.; BARROS, H. V. V. A. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p 205–274.

SOUSA, D. M. G de.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

TEIXEIRA, W. G.; ALVAREZ V, V. H.; NEVES, J. C. L.; PAULUCIO, R. B. Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 44, 2020.

VERONESE, M. **Acidez do solo e produtividade da soja em função de calagem e rotação de culturas**. 2011. 106. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

WANG, X.; TANG, C.; MAHONY, S.; BALDOCK, J. A.; BUTTERLY, C. R. Factors affecting the measurement of soil pH buffer capacity: approaches to optimize the methods. **European Journal of Soil Science**, [s.l.], v. 66, n. 1, p. 53–64, 2015.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 32, p. 2297-2305, 2008.

WIJANARKO, A.; TAUFIQ, A. Effect of lime application on soil properties and soybean yield on tidal land. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 14-23, 2016.

ZANCANARO, L.; KAPPES, C.; VALENDORFF, J. D. P.; CORADINI, D.; DAVID, M. A.; ONO, F. B.; SEMLER, T. D.; VIDOTTI, M. V. Manejo do solo, adubação e nutrição na cultura da soja. In: **Boletim de pesquisa 2017/2018**. Rondonópolis: Fundação MT, 2018.

## APÊNDICE

## MODELOS ESTATÍSTICOS

Tabela 4 – Modelo estatístico das variáveis avaliadas nos dois locais de estudo. (continua)

| Local  | Safra  | Profundidade | Variável | Modelo                            | R <sup>2</sup>              | valor p |
|--|--------|--------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------|---------|
| Atributos químicos do solo do experimento de incubação |        |              |          |                                   |                             |         |
| Local1   |        |              | pH       | $y = 5,75x^2 + 0,356x + 5$        | 0,98                        | < 1%    |
|  |        |              | H+Al     | $y = 5,34x^2 - 0,237x + 2,18$     | 0,98                        | < 1%    |
|  |        |              | Ca       | $y = -0,0043x^2 + 0,152x + 0,85$  | 0,99                        | < 1%    |
|  |        |              | Mg       | $y = -0,0033x^2 + 0,073x + 0,51$  | 0,94                        | < 1%    |
|  |        |              | V%       | $y = 5,76x^2 + 6,55x + 38,6$      | 0,98                        | < 1%    |
|  |        |              | B        | -                                 | -                           | -       |
|  |        |              | Cu       | $y = 0,00045x^2 - 0,011x + 0,65$  | 0,55                        | < 5%    |
|  |        |              | Fe       | $y = - 0,545x + 45,8$             | 0,85                        | < 1%    |
|  |        |              | Mn       | $y = 8,77x^2 + 0,587x + 19,8$     | 0,95                        | < 1%    |
|  |        |              | Zn       | -                                 | -                           | -       |
|  | Local2 |              |          | pH                                | $y = 14x^2 + 0,138x + 4,26$ | 0,99    |
|  |        |              | H+Al     | $y = 15,8x^2 - 0,257x + 5,85$     | 0,99                        | < 1%    |
|  |        |              | Ca       | $y = - 0,0028x^2 + 0,19x + 1,2$   | 0,99                        | < 1%    |
|  |        |              | Mg       | $y = - 0,0025x^2 + 0,121x + 0,93$ | 0,99                        | < 1%    |
|  |        |              | V%       | $y = 15,3x^2 + 3,16x + 29,2$      | 0,99                        | < 1%    |
|  |        |              | B        | $y = - 0,0053x + 0,203$           | 0,52                        | < 1%    |
|  |        |              | Cu       | $y = 0,0254x + 6,43$              | 0,54                        | < 5%    |
|  |        |              | Fe       | $y = 5,51x^2 - 2,49x + 53,6$      | 0,97                        | < 1%    |
|  |        |              | Mn       | $y = 0,0694x^2 - 1,18x + 29,7$    | 0,77                        | < 1%    |
|  |        |              | Zn       | -                                 | -                           | -       |

Tabela 4 – Modelo estatístico das variáveis avaliadas nos dois locais de estudo. (continua)

| Local  | Safra | Profundidade | Variável | Modelo                            | R <sup>2</sup> | valor p |
|--|-------|--------------|----------|-----------------------------------|----------------|---------|
| Atributos químicos do solo do experimento de campo |       |              |          |                                   |                |         |
| Local1   | 19/20 | 0,0-0,20     | pH       | $y = - 0,0053x^2 + 0,223x + 5$    | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = 6,16x^2 - 0,156x + 1,92$     | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = - 0,0019x^2 + 0,126x + 1,13$ | 0,99           | < 5%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 4,36x^2 + 0,0687x + 0,675$   | 0,73           | < 5%    |
|  |       |              | V%       | $y = 6,43x^2 + 4,67x + 48,2$      | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | B        | -                                 | -              | -       |
|  |       |              | Cu       | $y = - 0,013x + 0,69$             | 0,96           | < 1%    |
|  |       |              | Fe       | $y = - 1,29x + 54,9$              | 0,93           | < 1%    |
|  |       |              | Mn       | -                                 | -              | -       |
|  |       |              | Zn       | $y = - 0,013x + 1,371$            | 0,56           | < 5%    |
| Local2   | 19/20 | 0,0-0,20     | pH       | $y = 0,0854x + 4,35$              | 0,94           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = 12,6x^2 - 0,17x + 3,99$      | 0,99           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 0,15x + 1,53$                | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 0,0764x + 1,19$              | 0,93           | < 1%    |
|  |       |              | V%       | $y = - 0,088x^2 + 3,67x + 42$     | 0,99           | < 1%    |
|  |       |              | B        | -                                 | -              | -       |
|  |       |              | Cu       | $y = - 0,0391x + 7,71$            | 0,85           | < 1%    |
|  |       |              | Fe       | $y = - 0,6846x + 67,9$            | 0,86           | < 1%    |
|  |       |              | Mn       | $y = 0,2262x + 34,2$              | 0,91           | < 5%    |
|  |       |              | Zn       | -                                 | -              | -       |
| Local1   | 19/20 | 0,20-0,40    | pH       | $y = 0,0545x + 4,7$               | 0,94           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = - 0,0243x + 1,76$            | 0,82           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 0,0273x + 0,906$             | 0,89           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 16,7x^2 + 0,0198x + 0,37$    | 0,88           | < 1%    |
|  |       |              | V%       | $y = 1,04x + 43,2$                | 0,85           | < 1%    |
| Local2   | 19/20 | 0,20-0,40    | pH       | $y = 0,0177x + 4,07$              | 0,94           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = - 0,0616x + 4,52$            | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 10,2x^2 + 0,0469x + 1,01$    | 0,97           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 8,8x^2 + 0,0312x + 0,642$    | 0,95           | < 1%    |
|  |       |              | V%       | $y = 0,766x + 29,9$               | 0,97           | < 1%    |
| Local1   | 19/20 | 0,40-0,60    | pH       | $y = 0,0312x + 4,81$              | 0,85           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = - 0,00696x + 1,48$           | 0,41           | < 5%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 5,25x^2 + 0,05x + 0,925$     | 0,84           | < 5%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 4,07x^2 + 0,025x + 0,325$    | 0,63           | < 5%    |
|  |       |              | V%       | $y = 0,405x + 48,5$               | 0,58           | < 1%    |

Tabela 4 – Modelo estatístico das variáveis avaliadas nos dois locais de estudo. (continua)

| Local  | Safra | Profundidade | Variável | Modelo                             | R <sup>2</sup> | valor p |
|--|-------|--------------|----------|------------------------------------|----------------|---------|
| Atributos químicos do solo do experimento de incubação |       |              |          |                                    |                |         |
| Local1   | 20/21 | 0,0-0,20     | pH       | $y = 8,11x^2 + 0,219x + 4,6$       | 0,94           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = 8,5x^2 - 0,109x + 1,77$       | 0,99           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = - 0,0057x^2 + 0,203x + 0,954$ | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = - 0,0043x^2 + 0,099x + 0,728$ | 0,93           | < 1%    |
|  |       |              | V%       | $y = 6,78x^2 + 5,01x + 47,8$       | 0,99           | < 1%    |
|  |       |              | B        | -                                  | -              | -       |
|  |       |              | Cu       | $y = - 0,0061x + 0,794$            | 0,49           | < 5%    |
|  |       |              | Fe       | $y = - 0,03586x + 41,194$          | 0,82           | < 1%    |
|  |       |              | Mn       | -                                  | -              | -       |
|  |       |              | Zn       | -                                  | -              | -       |
| Local2   | 20/21 | 0,0-0,20     | pH       | $y = 0,0988x + 4,18$               | 0,97           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = 0,0049x^2 - 0,258x + 4,92$    | 0,98           | < 5%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 0,155x + 1,012$               | 0,99           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 0,0764x + 0,894$              | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | V%       | $y = - 0,0557x^2 + 3,53x + 31,7$   | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | B        | -                                  | -              | -       |
|  |       |              | Cu       | $y = - 0,04839x + 8,42$            | 0,71           | < 1%    |
|  |       |              | Fe       | $y = - 0,5445x + 51,97$            | 0,68           | < 1%    |
|  |       |              | Mn       | $y = 0,2696x + 25,6869$            | 0,60           |         |
|  |       |              | Zn       | -                                  | -              | -       |
| Local1   | 20/21 | 0,20-0,40    | pH       | $y = 0,0405x + 4,65$               | 0,95           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = - 0,0314x + 1,84$             | 0,93           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 0,0316x + 0,53$               | 0,93           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 4,5x^2 + 0,0625x + 0,4$       | 0,94           | < 5%    |
|  |       |              | V%       | $y = 1,28x + 36,7$                 | 0,93           | < 1%    |
| Local2   | 20/21 | 0,20-0,40    | pH       | $y = 0,0191x + 4,05$               | 0,75           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = - 0,0641x + 4,89$             | 0,93           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 0,0411x + 0,523$              | 0,96           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 0,0259x + 0,445$              | 0,98           | < 1%    |
|  |       |              | V%       | $y = 1,11x + 19$                   | 0,95           | < 1%    |
| Local1   | 20/21 | 0,40-0,60    | pH       | $y = 0,0277x + 4,78$               | 0,97           | < 1%    |
|  |       |              | H+Al     | $y = - 0,0107x + 1,53$             | 0,86           | < 1%    |
|  |       |              | Ca       | $y = 0,0112x + 0,625$              | 0,95           | < 1%    |
|  |       |              | Mg       | $y = 8,89x^2 + 0,0188x + 0,317$    | 0,88           | < 5%    |
|  |       |              | V%       | $y = 0,607x + 39,7$                | 0,89           | < 1%    |

Tabela 4 – Modelo estatístico das variáveis avaliadas nos dois locais de estudo. (continua)

| Local                       | Safra | Profundidade | Variável | Modelo                            | R <sup>2</sup> | valor p |
|-----------------------------|-------|--------------|----------|-----------------------------------|----------------|---------|
| Nutrientes foliares da soja |       |              |          |                                   |                |         |
| Local1                      | 19/20 |              | Ca       | $y = 9,563x^2 + 0,3625x + 9,558$  | 0,99           | < 1%    |
|                             |       |              | Mg       | $y = - 0,007x^2 + 0,144x + 3,883$ | 0,63           | < 1%    |
|                             |       |              | K        | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | B        | $y = - 0,0648x^2 + 1x + 46,79$    | 0,72           | < 5%    |
|                             |       |              | Cu       | $y = - 0,0104x^2 + 0,259x + 10,8$ | 0,47           | < 5%    |
|                             |       |              | Fe       | $y = 1,2914x + 107,6$             | 0,68           | < 1%    |
|                             |       |              | Mn       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | Zn       | $y = - 0,3845x + 33,12$           | 0,89           | < 1%    |
| Local2                      | 19/20 |              | Ca       | $y = - 0,0165x^2 + 0,542x + 10,7$ | 0,99           | < 1%    |
|                             |       |              | Mg       | $y = 0,0689x + 5,594$             | 0,93           | < 1%    |
|                             |       |              | K        | $y = - 0,0364x^2 + 0,831x + 22,5$ | 0,85           | < 1%    |
|                             |       |              | B        | $y = 8,7037x^2 - 0,675x + 37,55$  | 0,76           | < 1%    |
|                             |       |              | Cu       | $y = - 0,0086x^2 + 0,349x + 11,7$ | 0,92           | < 5%    |
|                             |       |              | Fe       | $y = 1,8046x + 83,83$             | 0,94           | < 1%    |
|                             |       |              | Mn       | $y = 4,226x^2 - 37,8375x + 264$   | 0,99           | < 1%    |
|                             |       |              | Zn       | $y = 8,564x^2 - 4,6813x + 59,9$   | 0,98           | < 1%    |
| Local1                      | 20/21 |              | Ca       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | Mg       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | K        | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | B        | $y = - 0,223x + 41,27$            | 0,42           | < 5%    |
|                             |       |              | Cu       | $y = - 0,04679x + 12,33$          | 0,39           | < 5%    |
|                             |       |              | Fe       | $y = - 1,9536x + 220,97$          | 0,87           | < 1%    |
|                             |       |              | Mn       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | Zn       | -                                 | -              | -       |
| Local2                      | 20/21 |              | Ca       | $y = 0,1411x + 9,598$             | 0,85           | < 1%    |
|                             |       |              | Mg       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | K        | $y = - 0,1602x + 28,56$           | 0,68           | < 5%    |
|                             |       |              | B        | $y = - 0,4825x + 35,93$           | 0,98           | < 1%    |
|                             |       |              | Cu       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | Fe       | -                                 | -              | -       |
|                             |       |              | Mn       | $y = 5,3284x^2 - 26,831x + 286,3$ | 0,98           | < 1%    |
|                             |       |              | Zn       | $y = - 1,14x + 49,3$              | 0,93           | < 1%    |
| Altura de plantas           |       |              |          |                                   |                |         |
| Local1                      | 19/20 |              |          | $y = 8,85x^2 + 1,44x + 69,4$      | 0,98           | < 1%    |
|                             | 20/21 |              |          | -                                 | -              | -       |
| Local2                      | 19/20 |              |          | $y = 8,59x^2 + 2,73x + 59,3$      | 0,96           | < 1%    |
|                             | 20/20 |              |          | $y = 9,73x^2 + 1,38x + 82$        | 0,95           | < 1%    |
|                             | 20/21 |              |          | $y = 8,35x^2 + 1,34x + 93,4$      | 0,99           | < 1%    |

Tabela 4 – Modelo estatístico das variáveis avaliadas nos dois locais de estudo. (conclusão)

| Local                  | Safra | Profundidade | Variável | Modelo                             | R <sup>2</sup> | valor p |
|------------------------|-------|--------------|----------|------------------------------------|----------------|---------|
| Produtividade de grãos |       |              |          |                                    |                |         |
| Local1                 | 19/20 |              |          | $y = 8,52x^2 + 0,0965x + 2,87$     | 0,83           | < 1%    |
|                        | 20/21 |              |          | $y = 4,46x^2 + 0,0934x + 2,75$     | 0,97           | < 1%    |
| Local2                 | 19/20 |              |          | $y = 0,0686x + 2,88$               | 0,81           | < 1%    |
|                        | 20/20 |              |          | $y = - 0,00596x^2 + 0,201x + 2,03$ | 0,98           | < 1%    |
|                        | 20/21 |              |          | $y = 0,0388x + 3,87$               | 0,94           | < 1%    |

Fonte: Do autor (2021).