



OTÁVIO LOPES VIEIRA CAMPOS

**EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO APLICADAS EM
SUPERFÍCIE E INCORPORADO NA PRODUTIVIDADE DE
GRÃOS E NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS COM
DIFERENTES TEORES DE ARGILA**

**LAVRAS – MG
2024**

OTÁVIO LOPES VIEIRA CAMPOS

**EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO APLICADAS EM SUPERFÍCIE E
INCORPORADO NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E NOS ATRIBUTOS
QUÍMICOS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA**

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 obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2024**

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

Campos, Otávio Lopes Vieira.

Efeito de doses de calcário aplicadas em superfície e incorporado na produtividade de grãos e nos atributos químicos de solos com diferentes teores de argila / Otávio Lopes Vieira Campos. - 2024.

52 p.

Orientador(a): Silvino Guimarães Moreira.

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

Bibliografia.

1. Calagem Superficial. 2. Plantio Direto. 3. Preparo Ocasional do Solo. I. Moreira, Silvino Guimarães. II. Título.

OTÁVIO LOPES VIEIRA CAMPOS

**EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO APLICADAS EM SUPERFÍCIE E
INCORPORADO NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E NOS ATRIBUTOS
QUÍMICOS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA**

**EFFECT OF LIMESTONE RATES APPLIED TO SURFACES AND
INCORPORATED ON GRAIN YIELD AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOILS
WITH DIFFERENT CLAY CONTENT**

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 obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de fevereiro de 2024.

Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel UFLA

Dr. Devison Souza Peixoto REHAGRO

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2024**

*Á minha mãe, Sônia, ao meu pai, Valter,
e à minha irmã, Gabriela,
por todo apoio e carinho.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me permitir realizar mais um sonho e por ter colocado pessoas maravilhosas em meu caminho.

À minha mãe Sônia, por todo apoio e pelo exemplo de dedicação aos estudos.

Ao meu pai Valter, por me servir de fonte de inspiração.

À minha irmã Gabriela, por todo o apoio.

À minha namorada Gabriela, por todo apoio durante a realização do trabalho e pela companhia aos finais de semana dedicados ao mestrado.

Ao Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira, por toda a orientação, cuidado e amizade durante esse período.

Aos membros do grupo GMAP, por todo apoio na condução dos experimentos.

Ao meu amigo Josias, por grande apoio na condução dos experimentos e horas de estrada, além de bons momentos vividos.

Ao Vitor Olivério, por todo apoio na condução dos experimentos e organização dos dados.

Ao Dr. Devison Peixoto, por todo apoio nas análises estatísticas.

Ao Alessandro Alvarenga, pelo apoio com o georreferenciamento dos experimentos.

À AMPAR, pelo suporte financeiro oferecido que permitiu a realização do trabalho.

Aos funcionários do Setor de Grandes Culturas do DAG, pelo apoio nas avaliações dos experimentos.

Às Fazendas G7, 3W, Estiva, Rocinha e Mato Verde, por cederem os locais para realização dos experimentos e pelo apoio oferecido.

Ao Matheus (Balão), Adriano, Douglas e Divino, pelo apoio na condução dos experimentos no campo.

Ao programa de Pós-Graduação em Fitotecnia e Universidade Federal de Lavras pela oportunidade.

A todos os meus amigos, pelo apoio e momentos compartilhados durante essa trajetória.

A todos meus irmãos da República A Marvada, pelos momentos vividos e pelo apoio na realização do trabalho.

A toda minha família e a aqueles que de alguma forma me apoiaram.

Muito Obrigado!

RESUMO

O Brasil destaca-se na conjuntura global da produção de alimentos em função da sua atual produção de grãos, bem como pelo seu potencial de aumento da produção nos próximos anos, devido ao aumento da produtividade agrícola. Como a maioria dos solos brasileiros são naturalmente ácidos e com baixos teores Ca^{2+} e Mg^{2+} , é necessário realizar a calagem de maneira correta antes implantação do sistema de plantio direto (SPD). Como não é mais desejável o revolvimento do solo após a adoção do SPD, na maioria das vezes o calcário é aplicado na superfície sem incorporação. No entanto, ainda existem muitos questionamentos sobre a eficiência da calagem em solos sob SPD, principalmente sobre a necessidade de incorporação do corretivo da acidez, com a reabertura das áreas depois de determinado tempo da calagem inicial, sobretudo em solos mais argilosos. Diante disso, objetivou-se neste estudo avaliar a eficiência de doses crescentes de calcário aplicadas em superfície, sem incorporação, comparadas com uma dose incorporada na produtividade das culturas e nas condições químicas de solos sob SPD, com diferentes teores de argila. Os experimentos foram conduzidos de maneira independente em três localidades no estado de Minas Gerais, Local 1 (52% de argila), Local 2 (41% de argila), Local 3 (21 % de argila). Foi adotado o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições e seis tratamentos, os quais foram compostos por cinco doses de calcário (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha^{-1}), aplicadas em superfície (sem incorporação), e uma dose de 8 Mg ha^{-1} , com incorporação do corretivo. Cada parcela foi composta por 10 m de largura e 20 m de comprimento. Os experimentos foram implantados antes da safra de 2019/20 e análises de solo foram realizadas três anos após a aplicação do calcário (ano de 2022). Os efeitos da calagem superficial nos atributos químicos dos solos com os maiores teores de argila (locais 1 e 2) concentraram-se na camada de 0-0,10 m, enquanto no solo mais arenoso (Local 3) houve aumento de V % e pH até a camada de 0,20-0,40 m. Além disso, em todos os locais, a aplicação das maiores doses na superfície (6 e 8 Mg ha^{-1}) conferiram maiores efeitos em profundidade do que às menores doses aplicadas. Quando incorporado, o calcário foi mais eficiente em corrigir a camada de 0,10-0,20 m, principalmente nos solos mais argilosos (locais 1 e 2). A produtividade acumulada de grãos durante os três anos de estudo aumentou somente no Local 2, o qual possuía a menor V% na camada de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo que a parcela que recebeu a aplicação de 8 Mg ha^{-1} , seguida de incorporação, apresentou maior produtividade. Portanto, a movimentação vertical do calcário no perfil solo foi diretamente proporcional à dose aplicada e inversamente proporcional ao teor de argila do solo.

Palavras-chave: calagem superficial; plantio direto; preparo ocasional do solo; textura do solo.

ABSTRACT

Brazil stands out in the global situation of food production due to its current grain production, as well as its potential to increase production in the coming years, due to the increase in crop yield. As most Brazilian soils are naturally acidic and have low Ca^{2+} and Mg^{2+} contents, it is necessary to carry out limestone doses correctly before implementing the no till (NT). As it is no longer desirable to disturb the soil after adopting NT, most of the time limestone is applied to the surface without incorporation. However, there are still many questions about the efficiency of liming in soils under NT, mainly about the need to incorporate the limestone with the reopening of production fields after a certain period of initial liming, especially in more clayey soils. Therefore, the goal of this study was to evaluate the efficiency of increasing doses of limestone applied to the surface, without incorporation, compared with an incorporated rate on crop yield and chemical conditions of soils under NT, with different clay contents. The experiments were conducted independently in three locations in the state of Minas Gerais, Site 1 (52% clay), Site 2 (41% clay), Site 3 (21% clay). A randomized block design was adopted, with four replications and six treatments, which were composed of five doses of limestone (0, 2, 4, 6 and 8 Mg ha^{-1}), applied to the surface (without incorporation), and one dose of 8 Mg ha^{-1} , with incorporation. Each plot was 10 m wide and 20 m long. The experiments were implemented before the 2019/20 harvest and soil analyzes were carried out three years after limestone application (2022). The effects of surface liming on the chemical attributes of soils with the highest clay contents (sites 1 and 2) were concentrated in the 0-0,10 m layer, while in the sandier soil (site 3) there was an increase in base saturation (BS) and pH up to the layer of 0,20-0,40 m. Furthermore, in all locations, the application of the highest doses on the surface (6 and 8 Mg ha^{-1}) gave greater effects in depth than the lowest applied doses. When incorporated, limestone was more efficient in correcting the 0,10-0,20 m layer, especially in the more clayey soils (sites 1 and 2). Accumulated grain yield during the three years of study increased only in Site 2, which had the lowest BS in the 0,10-0,20 and 0,20-0,40 m layers, with the plot receiving the application of 8 Mg ha^{-1} , followed by incorporation, showed greater grain yield. Therefore, the vertical movement of limestone in the soil profile was directly proportional to the applied dose and inversely proportional to the clay content of the soil.

Keywords: surface liming; no till; occasional soil preparation; soil texture.

INDICADORES DE IMPACTO

A projeção de produção de grãos no Brasil na safra 2023/24 é de 312,3 milhões de toneladas de grãos. No entanto, a população mundial continua em ritmo acelerado de crescimento e segundo as projeções, o planeta Terra pode alcançar o total de 8,5 e 9,7 bilhões de habitantes em 2030 e 2050, respectivamente. Diante desse cenário, há o aumento da demanda de comida no mundo e o Brasil ganha ainda mais atenção, devido à atual participação na produção mundial de alimentos e o potencial de aumento, o qual está relacionado principalmente à melhoria da produtividade, sem necessidade de grandes expansões territoriais. O futuro da segurança alimentar dependerá da proteção do solo e dos recursos hídricos e, para isso, serão necessários avanços na adoção de sistemas de produção mais eficientes, resilientes e sustentáveis. Como os solos brasileiros são originalmente ácidos e pobres em nutrientes, é importante ressaltar que uma das principais práticas para o aumento de produtividade e resiliência das culturas concentra-se no uso de calcário para a construção e manutenção da fertilidade do solo. Diante do exposto, é notório a necessidade de trabalhos científicos visando compreender a dinâmica da aplicação de diferentes doses de calcário em solos sob SPD com diferentes teores de argila em sistemas de produção de culturas anuais com elevadas produtividades. Foram avaliados seis tratamentos, os quais foram compostos por cinco doses de calcário (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹), aplicadas em superfície (sem incorporação), e uma dose de 8 Mg ha⁻¹, com incorporação do corretivo. O estudo avaliou os efeitos de doses de calcário aplicadas na superfície e incorporada nos atributos químicos do solo e produtividade das culturas em três locais com diferentes teores de argila. Com os resultados obtidos pode-se concluir que: (i) os efeitos da calagem aplicada em superfície nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m é diretamente proporcional à dose aplicada e inversamente proporcional ao teor de argila do solo; (ii) a incorporação do corretivo ao solo na camada de 0,0-0,2 m é mais eficiente em melhorar os atributos químicos solo na camada de 0,10-0,20 m em relação à mesma dose aplicada em superfície (iii) o preparo ocasional do solo através da incorporação do calcário com gradagem é uma alternativa para correção das camadas subsuperficiais em solos argilosos com alto gradiente químico.

IMPACT INDICATORS

The projection for grain production in Brazil in the 2023/24 harvest is 312.3 million tons of grains. However, the world population continues to grow at a fast pace and according to projections, planet Earth may reach a total of 8.5 and 9.7 billion inhabitants in 2030 and 2050, respectively. In view of this scenario, there is an increase in the demand for food in the world and Brazil gains even more attention, due to the current participation in world food production and the potential for increase, which is mainly related to the improvement of productivity, without the need for large territorial expansions. The future of food security will depend on the protection of soil and water resources, and for this to happen, advances will be needed in the adoption of more efficient, resilient and sustainable production systems. As Brazilian soils are originally acidic and nutrient-poor, it is important to note that one of the main practices for increasing crop productivity and resilience focuses on the use of limestone for the construction and maintenance of soil fertility. In view of the above, it is notorious the need for scientific studies aimed at understanding the dynamics of the application of different doses of limestone in soils under NT with different clay contents in annual crop production systems with high yields. Six treatments were evaluated, which were composed of five doses of lime (0, 2, 4, 6 and 8 Mg ha⁻¹), applied on the surface (without incorporation), and a dose of 8 Mg ha⁻¹, with incorporation of the corrective. The study evaluated the effects of lime doses applied on the surface and incorporated on soil chemical attributes and crop yield in three locations with

different clay contents. With the results obtained it can be concluded that: (i) the effects of liming applied on the surface in the layers of 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m is directly proportional to the applied dose and inversely proportional to the clay content of the soil; (ii) the incorporation of the soil corrective in the 0.0-0.2 m layer is more efficient in improving the soil chemical attributes in the 0.10-0.20 m layer in relation to the same dose applied on the surface; (iii) the occasional soil preparation through the incorporation of limestone with harrowing is an alternative for correction of the subsurface layers in clayey soils with high chemical gradient.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Sistema de plantio direto.....	15
2.2 Acidez e acidificação do solo.....	17
2.3 Métodos de recomendação de calagem.....	18
2.4 Efeitos da calagem em solos sob sistema de plantio direto	20
REFERÊNCIAS	22
SEGUNDA PARTE	26
EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO APLICADAS EM SUPERFÍCIE E INCORPORADO NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA	26
1 INTRODUÇÃO	28
2 MATERIAL E MÉTODOS	30
2.1 Caracterização dos locais	30
2.2 Instalação e condução dos experimentos	31
2.3 Coleta, preparo e quantificação de nutrientes nas amostras de solo	37
2.4 Produtividade das culturas.....	37
2.5 Análise estatística.....	37
3 RESULTADOS	38
3.1 Atributos químicos do solo	38
3.2 Produtividade de grãos.....	40
4 DISCUSSÃO	43
4.1 Atributos químicos do solo	43
4.2 Produtividade de grãos	45
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A projeção de produção de grãos no Brasil na safra 2023/24 é de 312,3 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2023). No entanto, a população mundial continua em ritmo acelerado de crescimento e segundo as projeções, o planeta Terra pode alcançar o total de 8,5 e 9,7 bilhões de habitantes em 2030 e 2050, respectivamente (DESA, 2022). Diante desse cenário, há o aumento da demanda de comida no mundo e o Brasil ganha ainda mais atenção, devido à atual participação na produção mundial de alimentos e o potencial de aumento, o qual está relacionado principalmente à melhoria da produtividade, sem necessidade de grandes expansões territoriais. Estudos recentes demonstram o potencial da agricultura brasileira em produzir com a otimização dos recursos, de maneira sustentável (Moreira *et al.*, 2023). O futuro da segurança alimentar dependerá da proteção do solo e dos recursos hídricos e, para isso, serão necessários avanços na adoção de sistemas de produção mais eficientes, resilientes e sustentáveis (FAO, 2022).

O sistema de plantio direto (SPD) evoluiu com a necessidade de reduzir a erosão do solo, melhorar a eficiência na produção, diminuir riscos e recuperar a qualidade da água e outros recursos (Gassen, 2010). Embora não haja relato oficial do número de hectares atualmente cultivado sob SPD no Brasil, em 2017 já existiam mais de 33 milhões de ha cultivados (IBGE, 2017). Em concordância com a demanda mundial de maior produção de alimentos com sustentabilidade, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento atualizou o Plano ABC+, propondo novas metas para serem alcançadas até 2030, dentre as metas, há o compromisso da ampliação da área sob SPD em 12,5 milhões de ha, visando aumentar a produtividade e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (MAPA, 2021).

Como os solos brasileiros são originalmente ácidos e pobres em nutrientes, é importante ressaltar que uma das principais práticas para o aumento de produtividade e resiliência das culturas concentra-se no uso de calcário para a construção e manutenção da fertilidade do solo (Moraes *et al.*, 2023). Um dos fatores que mais limitam a produtividade das culturas é a toxidez por alumínio (Al^{3+}) e os baixos teores de cátions básicos, além da presença de Mn^{2+} , quando encontrado em nível tóxico (Raij, 2011). O calcário é um insumo com baixa solubilidade em água (CaCO_3 : $0,014 \text{ g L}^{-1}$ e MgCO_3 : $0,106 \text{ g L}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$), que tem como função fornecer cálcio e magnésio às culturas, neutralizar os íons H^+ e Al^{3+} e elevar o pH (H_2O) para valores entre 6,0 e 6,5 (Raij, 2011).

Quando se trata do manejo da fertilidade em áreas sob SPD, o calcário é aplicado sobre a superfície, sem incorporação, pois um dos pilares do sistema é revolvimento mínimo do solo. O manejo adequado da calagem na superfície em SPD proporciona correção da acidez de camadas superficiais e do subsolo e, concomitantemente, a deposição de resíduos vegetais na superfície e o aumento no teor de matéria orgânica (MO) do solo, que exercem influência positiva na produtividade (Caires, 2013). No entanto, antes da implementação do SPD, é necessário realizar a incorporação do calcário em profundidade, visando corrigir o solo ao longo do perfil e propiciar um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular (Moreira, 2019). Moraes *et al.* (2023) observaram em experimentos a campo que a incorporação de calcário até 0,40 m do solo aumentou os teores de Ca e Mg e os valores de V% e pH ao longo da camada de 0,0 a 0,40 m. Os teores de H+Al reduziram em todas as áreas, melhorando as condições químicas para o crescimento radicular.

O método de recomendação de calagem para o Estado de Minas Gerais baseia-se na neutralização do alumínio tóxico e elevação dos teores de Ca e Mg (Alvarez; Ribeiro, 1999). Trabalhos mais recentes demonstraram respostas das culturas em produtividade com aplicação de doses de calcário superiores àquelas preconizadas pelos métodos oficiais (Resende *et al.*, 2016; Moraes *et al.*, 2023; Moreira *et al.*, 2024).

Quando se trata da calagem em SPD, o método de Minas Gerais sugere que as doses sejam calculadas para um terço da dose recomendada pelo Método da Neutralização do Alumínio Tóxico e Elevação dos Teores de Ca e Mg, quando a camada amostrada for de 0-0,20 m e para metade da dose quando a amostragem for feita na camada de 0-0,10 m (Alvarez; Ribeiro, 1999). No entanto, muitos técnicos realizam recomendações a campo de doses maiores (5 Mg ha^{-1}) de maneira empírica, por observar respostas em produtividade das culturas em algumas situações. Além disso, em estudos recentes tem sido observado respostas em produtividade com doses até duas vezes acima das oficialmente recomendadas (Bossolani *et al.*, 2021; Bossolani *et al.*, 2022). Por outro lado, desconhece-se trabalhos em condições do Cerrado e que compare a dinâmica da calagem superficial em função da variação da textura do solo com os atuais sistemas de produção em áreas de altas produtividades de grãos, o que demonstra a necessidade de mais estudos.

Atualmente tem sido recomendada a reabertura de muitas áreas cultivadas sob SPD com nova incorporação de calcário, principalmente naquelas áreas em que não houve adequada recomendação de dose e incorporação do corretivo antes da implementação do SPD. Por outro

lado, faltam critérios técnicos para que sejam tomadas tais decisões, as quais representam um grande investimento por parte dos produtores.

Ressalta-se também que a aplicação de uma dose superestimada de calcário poderia elevar demasiadamente o pH do solo na camada superficial. Como consequência, a elevação do pH reduziria a disponibilidade dos micronutrientes metálicos, deixando-os menos disponíveis às plantas (Rhoton, 2000). Por outro lado, foram observados altos teores de Zn e Mn nas camadas superficiais de solos sob SPD, fazendo com que esta explicação não seja sempre correta, mesmo quando os valores de pH e os teores de MO estavam altos (Moreira *et al.*, 2017). Diante do exposto, é notório a necessidade de trabalhos científicos visando compreender a dinâmica da aplicação de diferentes doses de calcário em solos sob SPD com diferentes teores de argila em sistemas de produção de culturais anuais com elevadas produtividades.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de plantio direto

O SPD foi introduzido no Brasil no final da década de setenta, na região Sul do país. A tecnologia surgiu como um método alternativo ao preparo do solo para controlar erosão nas lavouras cultivadas com a sucessão das culturas trigo e soja (Kochhannl; Denardin, 2000; Gassen, 2010). A expansão e importância do SPD no Brasil ocorreu simultaneamente na pesquisa e nas propriedades rurais, com o aumento das área cultivada ao longo dos anos. Os pioneiros na adoção do sistema buscaram informações com agricultores ingleses e norte-americanos, local onde a técnica surgiu. O termo “no-till”, que dispensa a necessidade de revolver o solo deu origem ao SPD no Brasil (Motter; Almeida, 2015). Devido a profusão de terminologias relacionadas ao “Plantio Direto” no Brasil, há utilização do termo de maneira incorreta em algumas situações. Enquanto o “Plantio Direto” é uma prática conservacionista que consiste em semear sem o revolvimento do solo, o “Sistema Plantio Direto” apresenta-se como um sistema de produção agrícola baseado em revolver minimamente o solo, mantendo o com cobertura permanente e sob rotação de culturas (Passomai *et al.*, 2022). Desta forma, o termo “Plantio Direto” equivale ao “no-till” utilizado fora do Brasil, sendo o SPD mais amplo.

A segurança alimentar do planeta depende da proteção dos recursos naturais e da adoção de práticas conservacionistas (FAO, 2022). De encontro com essa necessidade, é importante enaltecer que as principais vantagens da adoção do SPD são a melhoria na estrutura e porosidade do solo; controle efetivo da erosão; retenção de umidade no solo; redução da amplitude térmica do solo próximo à superfície; manutenção e incremento de MO no solo; e maior eficiência no uso da água (Phillips *et al.*, 1980). Além disso, há uma menor taxa de emissão de CO₂ em solo sob SPD, quando comparado a solos sob sistemas de cultivos convencionais (Wang *et al.*, 2020), fato que evidencia a sustentabilidade do sistema.

Os solos sob SPD apresentam maiores índices de carbono da biomassa microbiana comparado a solos que estão sob cultivos convencionais (Dadalto *et al.*, 2015). A adoção de sistemas de produção com maior diversidade de culturas, o qual é um dos pilares do SPD, aumenta a atividade microbiana no solo e de enzimas que são catalizadoras das reações metabólicas intracelulares, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação das substâncias húmicas e estruturação de solo. Essa maior atividade enzimática resulta em maior produtividade das culturas e pode explicar diferenças de produção em áreas que possuem solos com atributos químicos semelhantes (Mendes *et al.*, 2021).

Um grande desafio nas áreas sob SPD é a compactação solo, a qual possui grande potencial de reduzir a produtividade das culturas. Para mitigar esse problema, não é adequado o retorno do preparo do solo, que foi utilizado no passado e que trouxe inúmeros problemas ambientais. É necessário a aplicação dos princípios do SPD de maneira integrada com demais práticas, que incluem a implementação adequada do sistema, diversificação de culturas, cobertura permanente do solo, tráfego controlado em condições de alta umidade do solo, melhoria do manejo de plantas daninhas e uso de métodos de diagnóstico e monitoramento da compactação do solo que refletem as condições físicas do solo e sua relação com o rendimento das culturas (Peixoto *et al.*, 2020).

Diferentemente dos manejos convencionais, onde o calcário é incorporado ao solo, em áreas sob SPD esta prática é realizada mediante aplicação do corretivo em superfície, sem incorporação, visando atender uma das premissas desse sistema que é o revolvimento mínimo do solo (Caires, 2013; Resende, 2016). No entanto, para o sucesso do SPD é necessária uma boa correção do solo no seu estabelecimento, com doses adequadas de calcário, já que este é o principal insumo responsável pela neutralização do alumínio e hidrogênio, e que apresenta baixa solubilidade em água (CaCO_3 : $0,014 \text{ g L}^{-1}$ e MgCO_3 : $0,106 \text{ g L}^{-1}$ a 25° C) e baixa mobilidade no solo (Moraes *et al.*, 2023). Diante disso, torna-se indispensável uma boa homogeneização na incorporação do calcário para que se promova maior eficiência e distribuição de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil do solo e, posteriormente, as raízes ali presentes irão absorver os nutrientes necessários para seu desenvolvimento (Rampim *et al.*, 2011).

Um dos gargalos é que existem muitas áreas no Brasil que estão sob SPD que não foram corrigidas da maneira correta para implementação sistema. Nesse cenário, aplicações de calcário apenas na superfície, sem incorporação, visando corrigir os solos pode criar inicialmente uma condição de pH acima de 6,0 nas camadas superficiais, que é desfavorável à solubilização do calcário e, conseqüentemente, correção das camadas inferiores do solo (Allen; Hossner, 1991; Miller, 2015; Penn, 2019).

Nas áreas em que houve o correto estabelecimento do SPD, o manejo adequado da calagem na superfície proporciona correção da acidez de camadas superficiais e do subsolo e, concomitantemente, a deposição de resíduos vegetais na superfície e o aumento no teor de MO do solo, com influência positiva na produtividade (Caires, 2013). A calagem em superfície melhora a fertilidade do solo através do aumento do pH e da disponibilidade de P, Ca^{2+} e Mg^{2+} em todo o perfil do solo e aumenta a resiliência das culturas a períodos de estresses hídricos (Bossolani *et al.*, 2021; Bossolani *et al.*, 2022).

2.2 Acidez e acidificação do solo

A acidez do solo é um fator limitante à produtividade das culturas em consideráveis áreas do mundo, devido à toxicidade por Al^{3+} e Mn^{2+} e baixa saturação por bases (V%) (Coleman; Thomas, 1967). As condições de alta acidez causam dificuldades para o desenvolvimento radicular (Fageria, 2001) e afeta de forma direta a disponibilidade de vários nutrientes às plantas (Rodrighero *et al.*, 2015).

Existem diferentes tipos de acidez presente nos solos, podendo ser divididas em acidez ativa e acidez potencial, e esta, por sua vez, em acidez trocável e não trocável. A acidez ativa se refere aos íons H^+ dissociados na solução do solo. Por sua vez, a acidez trocável, trata-se dos íons de H^+ + Al^{3+} que estão retidos na superfície dos coloides por forças eletrostáticas. Por outro lado, a acidez não trocável é representada pelo hidrogênio de ligação covalente, associado aos coloides com carga negativa variável e aos compostos de alumínio (Lopes; Guilherme, 2016).

Os solos podem ser ácidos pela própria constituição do material de origem, como é o caso da maioria dos solos sob Cerrado, que têm baixo teor de cátions básicos (Lopes; Guilherme, 2016) ou podem tornar-se ácidos, nas regiões em que a precipitação é maior que a evapotranspiração, responsável pela lixiviação de bases no perfil (Fageria; Gheyi, 1999). A partir disso, as cargas positivas são substituídas por Al^{3+} e H^+ , para manutenção da eletroneutralidade (Raij, 2011).

A lixiviação dos elementos químicos presentes na solução do solo é governada pela preferência destes pela adsorção às cargas do solo. Esta preferência é dada pela carga e pelo raio iônico hidratado do íon. Quanto maior carga do íon e quanto menor seu raio iônico hidratado, maior sua atração à superfície dos coloides. Esta preferência de ligação é chamada de série liotrópica (Pauletti, 2020) e é uma das razões que faz com que muitos solos tropicais apresentem altas concentrações de íons Al^{3+} e H^+ e baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ (Sousa; Lobato, 2004).

Além da acidez natural dos solos, oriunda do longo processo de intemperismo, ocorre também a acidificação devido às práticas agrícolas adotadas. As altas retiradas de cátions básicos devido aos sucessivos cultivos agrícolas (exportação das culturas), bem como às adubações minerais, principalmente com fontes amoniacais, possuem papel de destaque na acidificação desses solos (Sousa *et al.*, 2007). Além disso, a mineralização da MO também contribui para o processo de acidificação (Prochnow, 2004). Outro fator que contribui para o aumento do processo é a respiração das raízes, com exsudação de H^+ e dissociação de gás

carbônico, naturalmente favorecida por solos de pH mais elevado, acima de 5,2 (Ye *et al.*, 2019).

A aplicação de fertilizantes nitrogenados a base de NH_4^+ causa a acidificação dos solos devido à liberação de íons H^+ que ocorre no processo de hidrólise dos cátions como Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} e Mn^{2+} (Novais *et al.*, 2007).

O poder acidificante dos fertilizantes é mensurado pelo índice de acidez, o qual se trata da quantidade de CaCO_3 , em kg, necessária para neutralizar a aplicação de 100 kg do fertilizante. O sulfato de amônio é a fonte nitrogenada que apresenta maior capacidade de acidificação do solo, apresentando índice de acidez de 110, enquanto para ureia é 84 e para o nitrato de amônio o índice é 62 (Vitti; Luz, 2001).

A aplicação de N em cobertura na cultura do milho reduziu linearmente o pH do solo nos trabalhos de Caires e Milla (2015). Os autores estimaram que para cada 100 kg ha^{-1} de N aplicados em cobertura, na forma de ureia, foram necessários 440 kg ha^{-1} de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 100% para combater a acidez gerada.

Em relação à adubação fosfatada, diferentes fontes de fósforo aplicadas no solo podem proporcionar diferentes intensidades de acidificação, a qual pode estar relacionada à composição química do fertilizante e às características mineralógicas do solo (Merten *et al.*, 2019). A utilização de fertilizantes fosfatados mais concentrados e que contenham amônio, pode provocar alterações no pH do solo, sendo as fontes mais conhecidas o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfato diamônico (DAP). A solubilização destes fertilizantes que contêm amônio causa um aumento do pH, principalmente ao redor dos grânulos do adubo, entretanto, após a reação de nitrificação do amônio pode ocorrer uma acidificação do solo (Paiva, 1990).

Diante do exposto, para o manejo inicial da acidez do solo nas aberturas de novas áreas, torna-se fundamental uma correta correção da acidez do solo, com incorporação do calcário de 0–4 m, para corrigir o pH e fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} , antes da implantação do SPD (Moraes *et al.*, 2023). Após o sistema estabelecido, deve-se avaliar anualmente as condições de correção da acidez dos solos e combater a acidez gerada mediante a aplicação de calcário em superfície (Caires, 2013). Mas, como não são disponíveis critérios de recomendação da dose e da frequência de aplicação de calcário para a maioria das regiões brasileiras, trabalhos que buscam avaliar as respostas das culturas diante da aplicação de doses crescentes de calcário são necessários e fundamentais.

2.3 Métodos de recomendação de calagem

Os boletins mais atuais de recomendação e corretivos e fertilizantes no Brasil são o boletim do Paraná (Pavinato *et al.*, 2017) e o de São Paulo (Cantarella *et al.*, 2022). Os critérios de recomendação são baseados no método de elevação da V%, desenvolvido por Quaggio (1983) e Quaggio *et al.* (1985), a partir de vários trabalhos realizados nas condições do estado de São Paulo. Em ambos, considera a amostragem de 0-0,20 m, sendo que toda a dose necessária é calculada pelo método da saturação por base e deve ser aplicada em uma única vez, sem parcelamento.

Para o Estado do Paraná, Caires (2013) também recomenda a elevação de V% a 70%. Porém, ressalta a importância do diagnóstico para aplicação, a qual deve ser realizada apenas para solos com pH (CaCl₂) menor que 5,6 ou V% inferior a 65% na camada de 00- 0,05 m. Por outro lado, em estudos mais recentes houve aumento de produtividade de soja e milho e uso mais eficiente da água com aplicação de 13 Mg ha⁻¹ de calcário na superfície e sem incorporação em áreas sob SPD estabelecido. A dose utilizada foi equivalente ao dobro da dose recomendada para elevação da V% a 70% (Bossolani *et al.*, 2022).

A Comissão de Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina recomenda como metodologia oficial para tais estados reduzir a dose para ¼ em área sob SPD consolidado, utilizando-se o método de SMP para pH (H₂O) 6,0 e fazendo amostragem na camada de 0-0,10 m, para solos sem restrições na camada de 0,10-0,20 m. Especial atenção deve ser dada em áreas de plantio direto que não foram implantadas com a correção da acidez na camada de 0-0,20 m e que a saturação por Al for igual ou superior a 30%, na camada de 0,10-0,20 m. Nesse cenário, recomenda-se que o calcário deve ser incorporado ao solo, por aração e gradagem, sendo utilizada a dose para pH 6,0, determinada pela média dos valores do índice SMP das amostras das camadas de 0-0,10 e de 0,10-0,20 m (Silva *et al.*, 2016). Tal método consiste em determinar o pH das amostras de solo em uma solução denominada SMP e quanto menor o pH aferido nessa solução, maior é o poder tampão (H+Al) do solo e, portanto, maior será a necessidade de calcário recomendada para correção. A presente metodologia necessita de uma calibração específica para cada tipo de solo, o que restringe sua aplicação para determinadas regiões.

Não há trabalhos específicos para calagem em superfície em solo sob SPD no estado de Minas Gerais, portanto, algumas recomendações são baseadas em pesquisas realizadas em outros estados,

Não há trabalhos específicos para calagem em superfície em solo sob SPD no estado de Minas Gerais, portanto, algumas recomendações são baseadas em pesquisas realizadas em

outros estados, com diferentes realidades. No Boletim para o Estado de Minas Gerais -5ª Aproximação (1999) é proposto que quando a amostragem se referir à camada 00-0,2 m, a dose do calcário seja diminuída em 1/3 da dose calculada. Por sua vez, quando a amostragem for realizada na camada de 0-0,10 m, a quantidade recomendada seja reduzida pela metade (Lopes, 1999). No entanto, trabalhos mais recentes apontam que lavouras com altas produtividades das culturas apresentam teores de Ca^{2+} , de 3 a 4,0 e Mg^{2+} , acima de 1,0 cmolc dm^{-3} (Moreira; Moreira, 2018; Moraes *et al.*, 2023).

2.4 Efeitos da calagem em solos sob sistema de plantio direto

A aplicação de calcário na superfície é eficiente para manutenção da fertilidade do solo, através do fornecimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} ; correção do pH; e neutralização do alumínio tóxico. Porém, a dinâmica do calcário aplicado nesse sistema é complexa, sendo influenciada por diversos fatores. Devido à baixa solubilidade do calcário, o regime hídrico influencia diretamente na reação do corretivo. Outro aspecto importante são as características físicas do solo, pois a presença de bioporos contribui para a mobilidade vertical do calcário. Além disso, a composição química e a granulometria do calcário também influenciam na eficiência da calagem (Caires, 2013).

Um dos principais desafios da manutenção da correção do solo sob SPD mediante aplicação de calcário em superfície é a mobilidade deste ao longo do perfil. O calcário pode proporcionar efeito de correção nas camadas superficiais e subsuperficiais (Oliveira; Pavan, 1996; Caires *et al.*, 2000; Rheinheimer *et al.*, 2000; Moreira *et al.*, 2001; Caires, 2013). No entanto, os efeitos nas camadas inferiores são demorados, sendo que seis meses após a aplicação, foram observadas alterações nos atributos químicos do solo apenas na camada de 0-0,05 m. Alterações abaixo desta camada só foram identificadas após avaliações de 18 e 30 meses (Cambri, 2004). Tal fato evidencia a necessidade de pesquisas de longa duração sobre o tema, principalmente porque atualmente muitas glebas têm sido reabertas, com novas incorporações de corretivo, sem ainda haver nenhuma validação científica.

As condições químicas do solo interferem na mobilidade do calcário ao longo do perfil. Em relação ao pH do solo, sabe-se que sua reação de dissolução e, por consequência, ação no perfil do solo é diminuída em valores de pH (H_2O) acima de 6,0. Nesta condição reduz a solubilização do calcário, favorecendo a sua concentração na superfície do solo (Allen; Hossner, 1991). As características físicas do solo também interferem na mobilidade do calcário ao longo do perfil, em solos com menor percentual de argila há maior quantidade de macroporos

(Naveed *et al.*, 2013), o que pode favorecer a movimentação vertical das partículas mais finas do corretivo.

No que tange às características químicas e físicas do calcário, ressalta-se a importância de se considerar não apenas o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT), mas também a reatividade ou granulometria (RE) e poder de neutralização (PN). O produto das últimas duas características, dividido por cem, forma o valor do PRNT, ou seja, $PRNT = (PN * RE) / 100$. A RE indica a granulometria do calcário, sendo determinada pela quantidade de material passante em cada uma das peneiras, sendo 0% para o material retido na peneira ABNT no 10 (2 mm), 20% para o material retido na peneira ABNT no 20 (0,84 mm), 60% para o material retido na peneira ABNT no 50 (0,30 mm) e 100% para o material que passa na peneira ABNT no 50. Por sua vez, o PN está relacionado à capacidade de neutralização da composição química daquele corretivo em equivalência de carbonato de cálcio (Lopes, 1991; Caires, 2016). Os corretivos com maior reatividade promovem um rápido aumento do pH e neutralização do alumínio (Alvarez *et al.*, 2010), podendo ser uma estratégia interessante utilizar corretivos com essa característica em solos sob SPD, por acelerar o processo de solubilização.

A aplicação de doses crescentes de calcário em solo em SPD aumenta o pH das camadas superficiais de maneira linear (Caires, 2016). Como consequência, a elevação do pH a valores próximos a 7,0, reduz os teores de micronutrientes metálicos (Rhoton, 2000), pois, 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 (Barber, 1995). A disponibilidade pode ser reduzida a ponto de causar deficiências às plantas em alguns solos, mas pode não ocorrer em solos mais argilosos, naturalmente mais ricos em micronutrientes (Moreira *et al.*, 2024).

O aumento excessivo do pH na camada superficial tem sido relacionada às deficiências de micronutrientes (Gupta *et al.*, 2008). No Brasil casos de deficiências sempre são atribuídas à aplicação de altas doses de calcário (Moreira *et al.*, 2024). Porém, em estudo realizado por Moreira *et al.* (2017), foram observados altos teores de Zn e Mn nas camadas superficiais de solos sob SPD, fazendo com que esta explicação não seja sempre correta, mesmo quando os valores de pH e os teores de MO estavam altos. Tais fatos, somados à maior exigência nutricional dos materiais genéticos modernos, evidenciam a necessidade de maiores estudos na área, principalmente para as condições de Cerrado e em solos com diferentes teores de argila.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, E. R.; HOSSNER, L. R. **Factors affecting the accumulation of surface-applied agricultural limestone in permanent pastures.** Soil Science, Madson, 1991.
- ALVAREZ V., V., H., RIBEIRO, A. C. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, 1999.
- ALVAREZ, E. *et al.* **Limestone Particle Size and Liming Scheduling Influence Soil Properties and Pasture Production.** Soil Science, 2010.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach.** 2.ed. New York, 1995.
- BOSSOLANI, João W. *et al.* **Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics.** Agron. Sustain, 2022.
- BOSSOLANI, João W. *et al.* **Long-Term Lime and Phosphogypsum Amended-Soils Alleviates the Field Drought Effects on Carbon and Antioxidative Metabolism of Maize by Improving Soil Fertility and Root Growth.** Front. Plant Sci, 2021.
- CAIRES, Eduardo F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto.** Informações agronômicas, 2013.
- CAIRES, Eduardo F.; FONSECA, Adriel F. **Absorção De Nutrientes Pela Soja Cultivada No Sistema De Plantio Direto Em Função Da Calagem Na Superfície.** Bragantia, Campinas, 2000.
- CAIRES, Eduardo F.; MILLA, Robert. **Adubação Nitrogenada Em Cobertura Para O Cultivo De Milho Com Alto Potencial Produtivo Em Sistema De Plantio Direto De Longa Duração.** Solos e Nutrição de Plantas: Bragantia, Campinas, 2016.
- CAMBRI, M. A. **Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2004.
- CANTARELLA, Heitor *et al.* **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico, 2022
- COLEMAN, N.T.; THOMAS, G.W. **The basic chemistry of soil acidity.** In: PEARSON, R.W. & ADAMS, F., eds. Soil acidity and liming. Madison, American Society of Agronomy, 1967.
- COMPAINHA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** Brasília, DF: 2023.
- DADALTO, Haroldo C. *et al.* **Sistema De Preparo Do Solo E Sua Influência Na Atividade Microbiana.** Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, 2015.

FAGERIA, N.K.; GHEYI, H.R. **Efficient crop production**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture –Systems at breaking point**. Rome, 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture –Systems at breaking point**. Rome, 2022.

GASSEN, Dirceu. **A adubação verde e o plantio direto**. Revista Plantio Direto, 2010.

GUPTA, U.C *et al.* **Micronutrients in soil, crops, and livestock**. Earth Science Frontiers, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTADÍSTICA. **Censo Agropecuário**. 2017.

KOCHHANN, Rainoldo A.; DENARDIN, José E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Embrapa Trigo: Passo Fundo, 2000.

LOPES A. S.; GUILHERME L. R. G. **A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil**. Advances in Agronomy, 2016.

MENDES, Iêda de C. *et al.* **Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. Embrapa Cerrados: Planaltina 2021.

MERTEN, Gean M. *et al.* **Potencial acidificante de diferentes fertilizantes fosfatados aplicados em dois solos do Paraná**. Revista Cultivando o Saber, 2019.

MILLER, L. **How fast is lime moving and is it treating acidity at depth?** Southern Farming Systems, 2015.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária**. Brasília, 2021.

MOAREAS, Flávio A. de *et al.* **Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils**. European Journal of Agronomy, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>.

MORAES, Flávio A. DE.; MOREIRA, Silvino G.; **Incorporação de novas áreas ao sistema de produção de grãos: doses e corretivos de acidez**. Instituto de Ciência e Tecnologia Comigo, 2020.

MOREIRA, Silvino G *et al.* **Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage**. Acta Scientiarum Agronomy: Maringá, 2017.

MOREIRA, Silvino G. **Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais.** Informações Agronômicas, 2019.

MOREIRA, Silvino G. *et al.* **Calagem em Sistema de Semeadura Direta e Efeitos sobre a Acidez do Solo, disponibilidade de Nutrientes e Produtividade de Milho e Soja.** R. Bras. Ci. Solo, 2001.

MOREIRA, Silvino G. *et al.* **Deep incorporation of high limestones rates affects the macro and micronutrients availability and the accumulated grain yield in three acidic sites in Brazil.** European Journal of Agronomy, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127074>.

MOREIRA, Silvino Guimarães *et al.* **Circular agriculture increases food production and can reduce N fertilizer use of commercial farms for tropical environments.** Science of the Total Environment, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163031>.

MOTTER, Paulino; ALMEIDA, Herlon D. (2015). **Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira.** Parque Itaipu: Foz do Iguaçu, 2015.

NAVEED, Muhammad *et al.* **Revealing Soil Structure and Functional Macroporosity along a Clay Gradient Using X-ray Computed Tomography.** Soil Science Society of America Journal, 2013. doi:10.2136/sssaj2012.0134.

NOVAIS, R. F. *et. al.* **Fertilidade do solo.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. **Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production.** Soil and Tillage Research, 1996.

PAIVA, P. J. R. **Parâmetros de fertilidade de um solo do Paraná sob diferentes sistemas de manejo.** Dissertação, Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas. UFPA, 1990.

PASSOMAI, Edivan J. *et al.* **Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view.** Division: Soil Use and Management, Commission – Soil and Water Management and Conservation, 2022.

PAULETTI, V. **Equilíbrio entre bases do solo e produtividade das culturas.** Informações Agronômicas, 2020.

PAVINATO, P. S. *et al.* **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná.** [S.l: s.n.], 2017.

PEIXOTO, Devison S. *et al.* **Occasional tillage in no-tillage systems: A global metaanalysis.** Science of the Total Environment, 2020.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. **A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants.** Agriculture, 2019.

PHILIPS, Ronald, E. *et al.* **No-Tillage Agriculture.** Science, 1980.

PROCHNOW, Luís Ignácio. **Avaliação e Manejo da Acidez do Solo**. Informações Agronômicas, 2004.

QUAGGIO, José A. **Crítérios para calagem em solos do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas – ESALQ/USP), 1983.

QUAGGIO, José A; RAIJ, Bernardo van; MALAVOLTA, Eurípedes; **Alternative use of the SMP buffer solution to determine lime requirement of soils**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1985.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. 1. ed. [s.l.] International Plant Nutrition Institute, 2011.

RAMPIM L, *et al.* **Atributos Químicos de Solo e Resposta do Trigo e da Soja ao Gesso em Sistema Semeadura Direta**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2011.

RESENDE, Álvaro V. *et al.* **Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo**. Informações Agronômicas: Nº 156, 2016.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* **Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

RHOTON, F.E. **Influence of time on soil response to no-till practices**. Soil Science Society of America Journal, 2000.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. **Aplicação Superficial de Calcário com Diferentes Teores de Magnésio e Granulometrias em Sistema Plantio Direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SILVA, Leandro S. da. **Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul. – [s. l.] : Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016.

SOUSA, Djalma M. G de. *et al.* **Fertilidade do solo**. SBCS: Viçosa, Cap. 5 p. 205-274, 2007.

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

VITTI, Godofredo C.; LUZ, Pedro H. C. **Utilização agronômica de corretivos agrícolas**. Piracicaba: FEALQ/GAPE, 2001.

WANG, Hao *et al.* **No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system**. Journal of Environmental Management, 2020.

YE, G. *et al.* **Long-term application of manure over plant residues mitigates acidification, builds soil organic carbon and shifts prokaryotic diversity in acidic Ultisols**. Applied Soil Ecology, 2019.

SEGUNDA PARTE

EFEITO DE DOSES DE CALCÁRIO APLICADAS EM SUPERFÍCIE E INCORPORADO NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA

RESUMO

Como a maioria dos solos brasileiros são naturalmente ácidos e com baixos teores Ca^{2+} e Mg^{2+} , é necessário realizar a calagem de maneira correta antes implantação do sistema de plantio direto (SPD). Como não é mais desejável o revolvimento do solo após a adoção do SPD, na maioria das vezes o calcário é aplicado na superfície sem incorporação. No entanto, ainda existem muitos questionamentos sobre a eficiência da calagem em solos sob SPD, principalmente sobre a necessidade de incorporação do corretivo da acidez, com a reabertura das áreas depois de determinado tempo da calagem inicial, sobretudo em solos mais argilosos. Diante disso, objetivou-se neste estudo avaliar a eficiência de doses crescentes de calcário aplicadas em superfície, sem incorporação, comparadas com uma dose incorporada na produtividade das culturas e nas condições químicas de solos sob SPD, com diferentes teores de argila. Os experimentos foram conduzidos de maneira independente em três localidades no estado de Minas Gerais, Local 1 (52% de argila), Local 2 (41% de argila), Local 3 (21 % de argila). Foi adotado o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições e seis tratamentos, os quais foram compostos por cinco doses de calcário (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha^{-1}), aplicadas em superfície (sem incorporação), e uma dose de 8 Mg ha^{-1} , com incorporação do corretivo. Os experimentos foram implantados antes da safra de 2019/20 e análises de solo foram realizadas três anos após a aplicação do calcário (ano de 2022). Os efeitos da calagem superficial nos atributos químicos dos solos com os maiores teores de argila (locais 1 e 2) concentraram-se na camada de 0-0,10 m, enquanto no solo mais arenoso (Local 3) houve aumento de V % e pH até a camada de 0,20-0,40 m. Além disso, em todos os locais, a aplicação das maiores doses na superfície (6 e 8 Mg ha^{-1}) conferiram maiores efeitos em profundidade do que às menores doses aplicadas. Quando incorporado, o calcário foi mais eficiente em corrigir a camada de 0,10-0,20 m, principalmente nos solos mais argilosos (locais 1 e 2). A produtividade acumulada de grãos durante os três anos de estudo aumentou somente no Local 2, o qual possuía a menor V% na camada de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo que a parcela que recebeu a aplicação de 8 Mg ha^{-1} , seguida de incorporação, apresentou maior produtividade. Portanto, a movimentação vertical do calcário no perfil solo foi diretamente proporcional à dose aplicada e inversamente proporcional ao teor de argila do solo.

Palavras-chave: calagem superficial; plantio direto; preparo ocasional do solo; textura do solo.

**EFFECT OF LIMESTONE RATES APPLIED TO SURFACES AND
INCORPORATED ON GRAIN YIELD AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOILS
WITH DIFFERENT CLAY CONTENT**

ABSTRACT

As most Brazilian soils are naturally acidic and have low Ca^{2+} and Mg^{2+} contents, it is necessary to carry out limestone doses correctly before implementing the no till (NT). As it is no longer desirable to disturb the soil after adopting NT, most of the time limestone is applied to the surface without incorporation. However, there are still many questions about the efficiency of liming in soils under NT, mainly about the need to incorporate the limestone with the reopening of production fields after a certain period of initial liming, especially in more clayey soils. Therefore, the goal of this study was to evaluate the efficiency of increasing doses of limestone applied to the surface, without incorporation, compared with an incorporated rate on crop yield and chemical conditions of soils under NT, with different clay contents. The experiments were conducted independently in three locations in the state of Minas Gerais, Site 1 (52% clay), Site 2 (41% clay), Site 3 (21% clay). A randomized block design was adopted, with four replications and six treatments, which were composed of five doses of limestone (0, 2, 4, 6 and 8 Mg ha^{-1}), applied to the surface (without incorporation), and one dose of 8 Mg ha^{-1} , with incorporation. The experiments were implemented before the 2019/20 harvest and soil analyzes were carried out three years after limestone application (2022). The effects of surface liming on the chemical attributes of soils with the highest clay contents (sites 1 and 2) were concentrated in the 0-0,10 m layer, while in the sandier soil (site 3) there was an increase in base saturation (BS) and pH up to the layer of 0,20-0,40 m. Furthermore, in all locations, the application of the highest doses on the surface (6 and 8 Mg ha^{-1}) gave greater effects in depth than the lowest applied doses. When incorporated, limestone was more efficient in correcting the 0,10-0,20 m layer, especially in the more clayey soils (sites 1 and 2). Accumulated grain yield during the three years of study increased only in Site 2, which had the lowest BS in the 0,10-0,20 and 0,20-0,40 m layers, with the plot receiving the application of 8 Mg ha^{-1} , followed by incorporation, showed greater grain yield. Therefore, the vertical movement of limestone in the soil profile was directly proportional to the applied dose and inversely proportional to the clay content of the soil.

Keywords: surface liming; no till; occasional soil preparation; soil texture.

1 INTRODUÇÃO

Com a adoção de práticas regenerativas em boa parte das áreas agrícolas brasileiras, como a rotação de culturas e o sistema de plantio direto (SPD) em larga escala, o Brasil impulsionou sua agricultura e se tornou um dos principais produtores mundiais de alimentos, com sustentabilidade ambiental (Moreira *et al.*, 2023). A adoção da prática do SPD contribuiu para reduzir as perdas de solo por erosão (Triplett; Dick, 2008), aumentar a biodiversidade do solo (Mendes *et al.*, 2021) e permitir o uso racional de fertilizantes através do aumento da eficiência das adubações (Moreira *et al.*, 2023). Além disso, após a adoção do SPD é gerado um saldo positivo no balanço de carbono do solo, mostrando que a prática do SPD é uma estratégia interessante para o sequestro de CO₂ da atmosfera (Oliveira *et al.*, 2023).

Para se obter sucesso na condução do SPD é indispensável a conciliação com as práticas de manejo da fertilidade do solo, pois os solos sob Cerrado são naturalmente ácidos, com altos teores de Al³⁺ e baixos teores de nutrientes (Lopes; Guilherme, 2016). Desta forma, antes da implementação do SPD, é fundamental a incorporação do calcário na camada de 0-0,40 m do solo, com a dose adequada de corretivo para neutralizar o Al³⁺ e fornecer Ca²⁺ e Mg²⁺, visando criar um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular das culturas, para que se tornem mais resilientes para suportar os constantes veranicos e atingir altas produtividades (Moraes *et al.*, 2023). Após a implantação do SPD, o revolvimento do solo não é mais desejável, por isso tem sido recomendada a correção da acidez do solo por meio da aplicação do corretivo em superfície, sem incorporação (Caires; Banzatto; Fonseca, 2000).

Como em muitas das atuais áreas de produção do Cerrado brasileiro não foi realizada a incorporação profunda do calcário antes do primeiro cultivo (Moreira, 2019), atualmente não apresentam condições químicas do solo adequadas para o desenvolvimento das culturas. Muitas apresentam baixa saturação por bases (V%) nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m e concentração de nutrientes na camada de 0-0,10 m (Zancanaro *et al.*, 2020). Além da falta de incorporação adequada do corretivo, muitos solos receberam doses inadequadas de calcário antes da implantação do SPD (Moreira, 2019; Cantarella *et al.*, 2022). Posteriormente, a não aplicação dos corretivos na frequência ou doses adequadas após a implantação do SPD contribuíram para agravar a situação.

As alternativas para se corrigir os solos que estão nessa condição seriam a aplicação do calcário em superfície, sem incorporação ou aplicação do corretivo seguida de incorporação. O calcário aplicado em superfície visando corrigir a camada de 0-0,40 m poderia melhorar o desenvolvimento radicular e aumentar a produtividade de grãos (Bossolani *et al.*, 2021; 2022).

No entanto, os efeitos da calagem superficial nos atributos químicos são mais lentos principalmente devido ao fato de o Ca^{2+} possuir uma mobilidade baixa no perfil, principalmente nos solos argilosos (Caires *et al.*, 2005). Além disso, como as camadas superficiais dos solos sob SPD apresentam valores de pH normalmente acima de 6,0, há redução na velocidade de reação do CaCO_3 aplicado na superfície sem incorporação (Allen; Hossner, 1991). A condição de pH próxima à alcalinidade também afeta a disponibilidade dos micronutrientes metálicos (Shuman, 1986; Moreira *et al.*, 2017).

A incorporação do calcário ao solo é uma alternativa para acelerar o processo de reação (Joris *et al.*, 2016) e dar condições para o desenvolvimento radicular das culturas em profundidade (Moraes *et al.*, 2023). Por outro lado, o processo de revolvimento do solo pode reduzir temporariamente o estoque de carbono orgânico (Yagi; Fidalski; Tormena, 2014; Peixoto *et al.*, 2020). Além disso, é uma operação que tem um custo mais elevado, quando comparada à aplicação do calcário em superfície e que pode gerar a perda de alguns benefícios do não revolvimento do solo. Diante dos fatos apresentados, as hipóteses do presente estudo são de que a incorporação do calcário, comparada à aplicação na superfície sem incorporação, aumenta a profundidade de ação do corretivo nas camadas mais profundas; além de aumentar a produtividade do sistema de produção ao longo dos anos, quando o solo apresenta baixa V % em subsuperfície; a mobilidade do Ca e do Mg ao longo do perfil é diretamente proporcional à dose de calcário aplicada e inversamente proporcional ao percentual de argila dos solos (Amaral *et al.*, 2004).

Diante disso, objetivou-se avaliar a produtividade das culturas e os efeitos nas condições químicas do solo em função de doses crescentes de calcário aplicadas em superfície e incorporado em solos sob SPD com diferentes teores de argila.

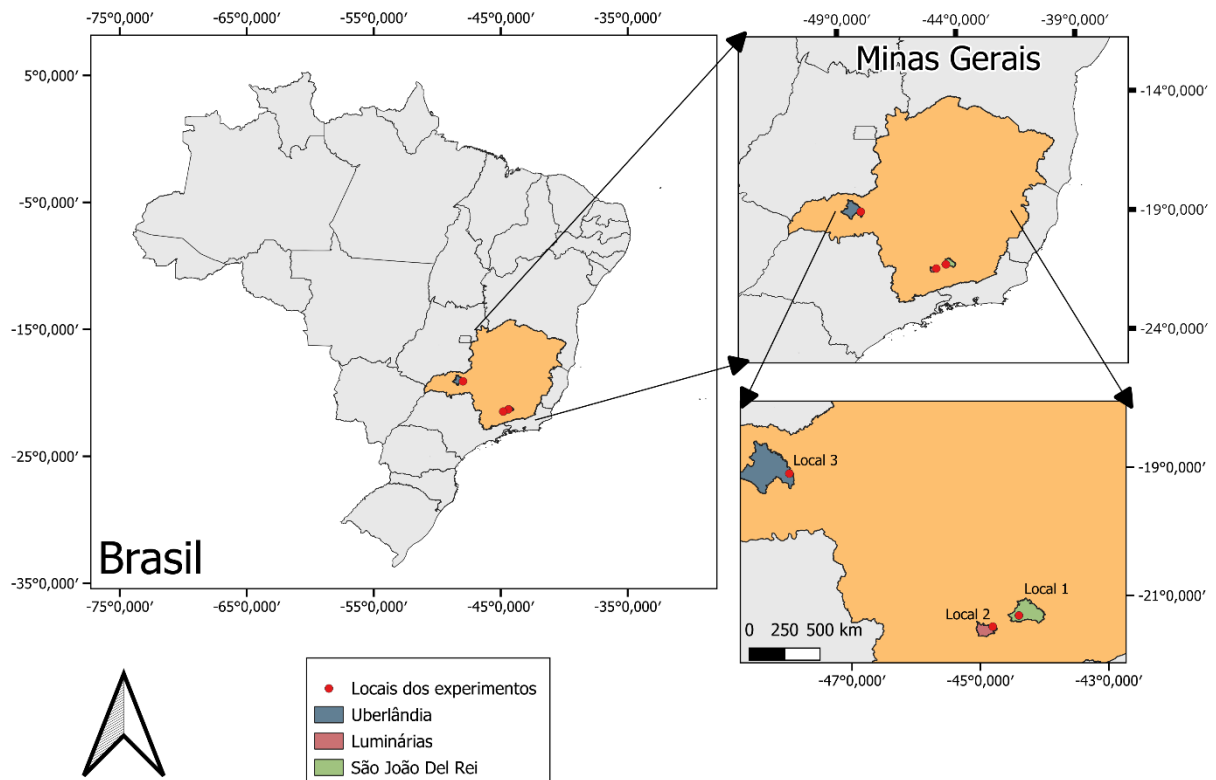
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos locais

O estudo foi conduzido em condições de campo em três localidades do Estado de Minas Gerais, Brasil: Fazenda Estiva, São João del Rei (Local 1); Fazenda Mato Verde, Luminárias (Local 2) e Fazenda Rocinha, Uberlândia (Local 3) (Figura 1). Os solos das áreas experimentais foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Santos *et al.*, 2018) e Typic Hapludox de acordo com a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). Antes da instalação dos experimentos foi realizada a caracterização química (Tabela 1) e física dos solos dos três locais (Tabela 2), de acordo com os métodos propostos por Silva (2009).

O clima dos três locais é classificado como Cwa (Alvares *et al.*, 2014), sendo caracterizado pela sazonalidade entre o inverno seco com temperaturas amenas e o verão chuvoso com temperaturas mais elevadas. As precipitações e temperaturas médias mensais dos locais em que os experimentos foram conduzidos podem ser vistos na Figura 2.

Figura 1 – Localização dos três experimentos conduzidos nos três anos de estudo.



Fonte: Do autor (2024).

2.2 Instalação e condução dos experimentos

Antes da implantação dos experimentos, todas as áreas estavam sob SPD com no mínimo seis anos sem revolvimento do solo. Os primeiros cultivos realizados foram nos anos de 1996, 2002 e 2003 nos locais 1, 2 e 3, respectivamente. Os experimentos foram instalados em delineamento em blocos casualizados e conduzidos de maneira independente nos três locais. Os tratamentos foram compostos por cinco doses de calcário (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) aplicadas em superfície (sem incorporação), e uma aplicação de 8 Mg ha⁻¹ com incorporação do corretivo. Trabalharam-se com quatro repetições, totalizando-se 24 parcelas por experimento, em cada um dos locais. O tamanho de cada parcela foi de 10 metros de largura (correspondente a duas passadas do distribuidor de calcário Bruttus[®]) por 20 metros de comprimento.

A implantação dos experimentos, com a aplicação das doses de calcário ocorreu nos dias 04/10/2019, 22/09/2019 e 25/05/2019 nos locais 1, 2 e 3, respectivamente. O calcário foi distribuído pelo Equipamento Bruttus[®], o qual realiza a distribuição de maneira gravitacional para redução da deriva e perda do corretivo durante a implantação dos experimentos. O calcário utilizado possuía as seguintes características físicas e químicas: Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) = 98%, Reatividade (RE) = 90%, Poder de Neutralização (PN) = 109%, CaO = 35% e MgO = 16%.

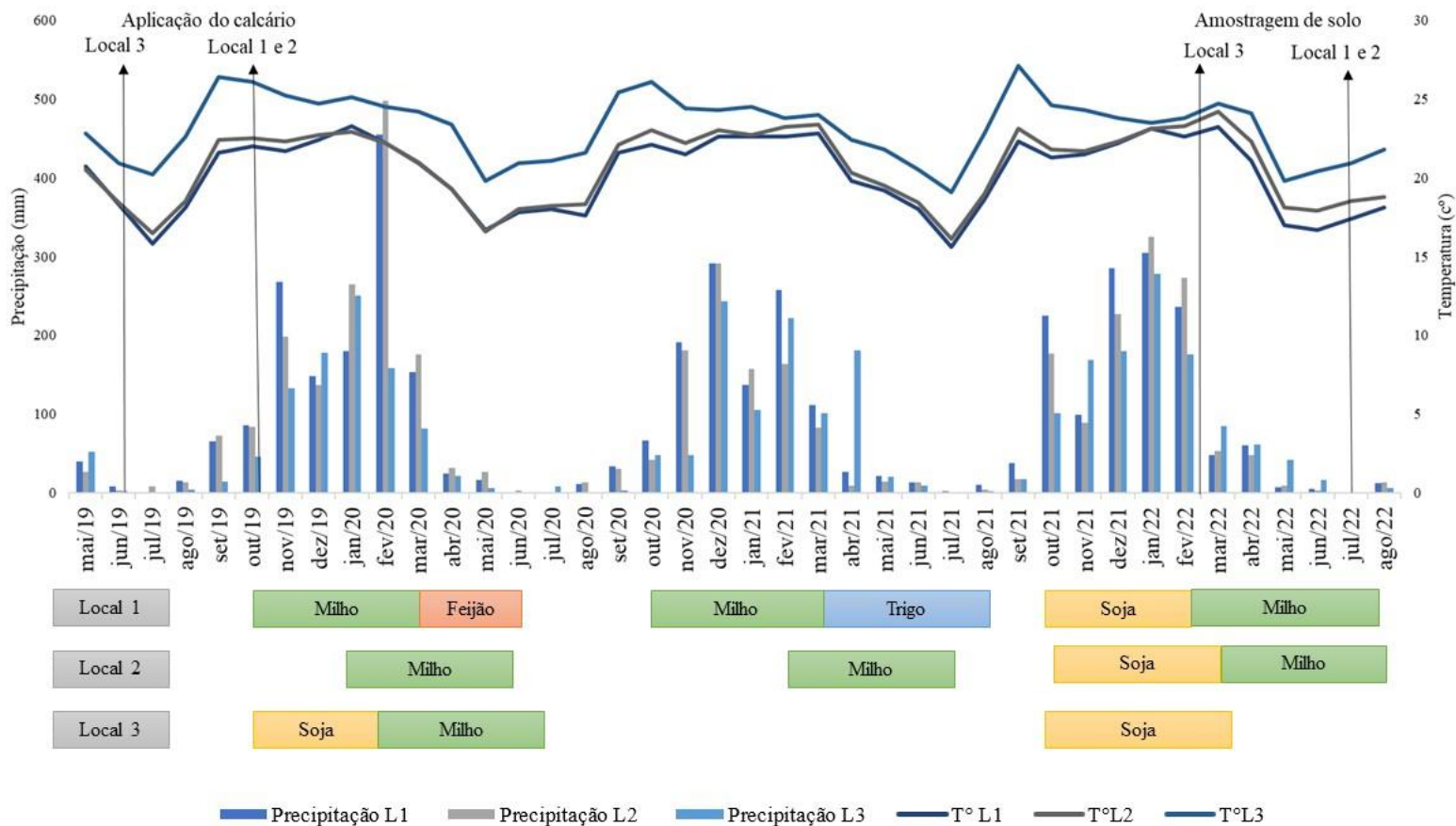
Nas parcelas com tratamento incorporado, foi simulada a reabertura da área, incorporando-se o corretivo com duas passadas da grade Piccin[®] 14x28 – 14 discos de 28 polegadas, com posterior acerto do terreno com duas passadas da grade niveladora Piccin[®] 40x20 – 40 discos de 20 polegadas, buscando-se incorporar o corretivo de 0 a 0,20 m. Após a instalação dos experimentos na safra de 2019/20 não houve novas aplicações de calcário e nenhuma prática de revolvimento do solo.

Existem na região duas safras por ano, localmente denominadas de safra de verão (outubro a fevereiro) e safra de inverno (fevereiro a agosto) (Moreira *et al.*, 2023) e como os experimentos foram implantados em área comercial, as culturas utilizadas após a aplicação dos tratamentos foram as mesmas utilizadas nas glebas comerciais dos produtores. Após a instalação do experimento e incorporação do calcário, foi realizada a semeadura da safra de verão 2019/20. A escolha das culturas implantadas, data de semeadura, cultivares, adubação e programa de proteção de plantas foram seguidos de acordo com o manejo adotado pelo produtor em todos os locais. O histórico de cultivo, cultivares utilizados, datas de semeadura, colheita e adubação realizadas ao longo das safras nos três locais são apresentados na Tabela 3.

No Local 1, o sistema de produção adotado foi milho (*Zea mays* L.) na primeira e segunda safra de verão (2019/20 e 2020/21) e soja (*Glycine max* L.) na terceira (2021/22). Na safra de inverno, adotou-se feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) (2019/20); trigo (*Triticum aestivum* L.) (2020/21) e milho (2021/22). No Local 2, foi cultivado na safra verão milho (2019/20) e soja (2021/22), por problemas operacionais não houve cultivo na safra verão 2020/21. Na safra de inverno, adotou-se milho (2020/21 e 2021/22), não houve cultivo na safra de inverno 2019/20. No Local 3, adotou-se soja na safra verão (2019/20 e 2021/22) e milho na safra de inverno (2019/20), por problemas operacionais não houve cultivos na safra verão 2020/21 e nas safras de inverno 2019/20 e 2021/22.

Nos três locais, na semeadura da soja, milho e feijão as sementes foram depositadas entre 3 e 5 cm de profundidade, enquanto o fertilizante utilizado na semeadura foi depositado ao lado e abaixo das sementes, com a profundidade de 12 a 15 cm. Por sua vez, na semeadura do trigo, realizado no Local 1, a semente foi depositada entre 2 e 3 cm e o fertilizante a 6 cm de profundidade. A semeadoras utilizadas foram John Deere® modelo 1113 com 12 linhas e Jumil® modelo 3090 com 8 linhas nos locais 1 e 2, respectivamente, em todos os cultivos. No Local 3 foi utilizada a semeadora Jumil® modelo 3080 com 11 linhas na safra 2019/20 e nas safras 2020/21 e 2021/22 foi utilizado a Stara® modelo Absoluta com 24 linhas.

Figura 2 – Épocas de aplicação do calcário, amostragem de solo e das culturas avaliadas, precipitações médias mensais e temperaturas médias mensais do Local 1 (L1), Local 2 (L2) e do Local 3 (L3).



Fonte: Do autor (2024).

Tabela 1 – Características químicas dos solos por camada dos três locais antes da instalação dos experimentos.

Prof.	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al	CTC	V	MO	B	Cu	Fe	Mn	Zn
m	(H₂O)	mg dm⁻³	———— cmolc dm⁻³ ————				%	g kg⁻¹	———— mg dm⁻³ ————						
Local 1															
0-0,10	6,0	10,0	0,3	3,1	1,0	0,2	2,4	7,0	65,0	3,8	0,4	0,7	31,4	8,9	3,4
0,10-0,20	5,4	5,6	0,1	1,7	0,5	0,2	3,0	5,5	43,9	2,8	0,8	0,7	35,0	4,8	2,2
0,20-0,40	5,2	1,4	0,2	1,6	0,5	0,1	2,3	4,7	50,1	2,4	0,4	0,7	32,9	4,1	1,6
Local 2															
0-0,10	5,6	27,0	0,4	2,1	0,5	0,1	2,9	6,0	54,2	3,6	0,3	0,9	34,2	8,5	3,5
0,10-0,20	5,3	10,8	0,3	1,2	0,4	0,1	3,6	5,6	34,5	2,9	0,3	1,1	35,5	3,6	1,3
0,20-0,40	5,1	3,6	0,2	1,0	0,3	0,1	2,8	4,4	34,4	2,8	0,3	1,1	34,7	4,2	1,1
Local 3															
0-0,10	5,4	4,4	0,1	2,1	0,6	0,2	1,8	4,8	61,0	1,7	0,3	0,8	46,2	20,4	1,6
0,10-0,20	5,4	1,3	0,1	1,5	0,4	0,2	2,1	4,3	48,8	1,3	0,2	0,9	55,7	10,5	1,2
0,20-0,40	5,0	4,4	0,4	1,0	0,2	0,2	2,1	3,9	43,6	1,3	0,2	1,0	30,4	14,6	3,0

Legenda: pH - pH em água (1:2,5 solo/solução); MO - matéria orgânica do solo (Na₂Cr₂O₇ 4 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 5 mol L⁻¹) (Silva, 2009); P e K resina mista (van Raij *et al.*, 1986); Fe, Zn, Mn e Cu (Silva, 2009); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol L⁻¹); S - Enxofre extraído como sulfato e o resultado foi convertido para S, (H+Al) - acidez potencial (SMP). CTC - capacidade de troca catiônica em pH 7,0 obtida adicionando Ca, Mg, K e H+Al; e saturação por bases [SB = ((Ca+Mg+K+H+Al)/CTC) × 100].

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 2 – Conteúdo de Argila, Areia e Silte totais dos solos dos três locais em diferentes profundidades.

Profundidade	Argila	Areia	Silte	Classificação textural
m	g kg⁻¹			
Local 1				
0,0–0,2	517	169	314	Argilosa
0,2–0,4	617	144	239	Muito argilosa
Local 2				
0,0–0,2	410	363	227	Argilosa
0,2–0,4	460	367	173	Argilosa
Local 3				
0,0–0,2	207	647	146	Franco argilosa-arenosa
0,2–0,4	220	663	117	Franco argilosa-arenosa

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 3 – Histórico de cultivo, cultivares, datas de semeadura e colheita e adubação.

Local	Safr	Cultura	Cultivar/híbrido	Semeadura	Colheita	Adubação de Plantio	Dose	Adubação de cobertura		
								KCl (60% K ₂ O)	Nitrogenada	Dose
							kg/ha	kg/ha		kg/ha
Local 1	2019/20	Milho	P 2501	23/10/2019	10/03/2020	10:52:00	200	150	ureia	400
	2020/20	Feijão	BRS Esteio	13/03/2020	27/06/2020	10:52:00	150	300	ureia	130
	2020/21	Milho	P 3016 VYHR	26/10/2020	22/03/2021	13:33:00 S15	330	300	ureia	560
	2021/21	Trigo	TBIO Aton	03/04/2021	11/08/2021	10:52:00	150	-	nitrato de amônio	150
	2021/22	Soja	P95R51	18/10/2021	19/02/2022	02:32:00	200	150	-	-
	2022/22	Milho	P 3646	25/02/2022	04/08/2022	10:52:00	150	-	nitrato de amônio	200
Local 2	2019/20	Milho	P 3707 VYH	16/01/2020	13/06/2020	13:33:00 S15	200	150	ureia	300
	2021/21	Milho	NS 80 VIP2	10/02/2021	30/07/2021	27:17:00 S10	300	-	-	-
	2021/22	Soja	DM 53I54 IPRO	24/10/2021	26/02/2022	07:40:00	150	150	-	-
	2022/22	Milho	P 3646	05/03/2022	07/08/2022	10:52:00	100	-	nitrato de amônio	180
Local 3	2019/20	Soja	NS 7300 IPRO	23/10/2019	14/02/2020	05-37-00	310	150	-	-
	2020/20	Milho	NS 73 Vip3	23/02/2020	21/07/2020	13:33:00 S15	270	-	25:00:25	500
	2021/22	Soja	NS 7901	18/10/2021	07/03/2022	05:25:25	350	-	-	-

Legenda: Ureia (45% de nitrogênio), nitrato de amônio (33% de nitrogênio).

Fonte: Do autor (2024).

2.3 Coleta, preparo e quantificação de nutrientes nas amostras de solo

Coletaram-se as amostras de solo após o último cultivo avaliado, sendo que nos locais 1 e 2, foi após a colheita da safra de inverno de 2022/22 e no Local 3 após a colheita da safra de verão de 2021/22. A precipitação acumulada desde a data da aplicação do calcário até a coleta de solo nos locais 1, 2, e 3 foi de 3876, 3706 e 2889 mm, respectivamente. As amostras foram coletadas com trado holandês nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo cinco amostras simples por parcela, que compuseram uma composta. As amostras compostas 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 foram determinadas as propriedades químicas do solo: pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis e $\text{H}+\text{Al}$, conforme metodologia descrita por Silva (2009). O pH foi determinado em água por meio de eletrodo combinado (proporção solo/água 1:1,25). O Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram extraídos por KCl 1 mol L^{-1} (solo/solução 1:10), em conjunto com o Al trocável, titulando-se, numa fração do extrato, o alumínio com NaOH , na presença de azul-de-bromotimol como indicador. Enquanto o K^+ foi extraído pela solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}). A acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) foi estimada através da leitura do pH SMP, o qual é baseado na mudança de pH da solução tamponada em face da acidez potencial do solo. Estimaram-se a soma de bases catiônicas trocáveis pela equação $\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$; a capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC) pela equação $\text{CTC} = \text{SB} + \text{H}+\text{Al}$, e a V% pela equação $[(\text{V}\% = ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}+\text{Al})/\text{CTC}) \times 100)]$.

2.4 Produtividade das culturas

A produtividade de grãos foi determinada a partir da colheita de três linhas com cinco metros de comprimento por parcela experimental. Foi padronizada a umidade dos grãos para 13% e definida a produtividade da área por parcela. A partir da produtividade por parcela foi estimada a produtividade por hectare (10.000 m^2).

2.5 Análise estatística

Todos os dados foram submetidos à análise de variância e quando os resultados foram significativos para o teste F, adotaram-se os procedimentos para o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

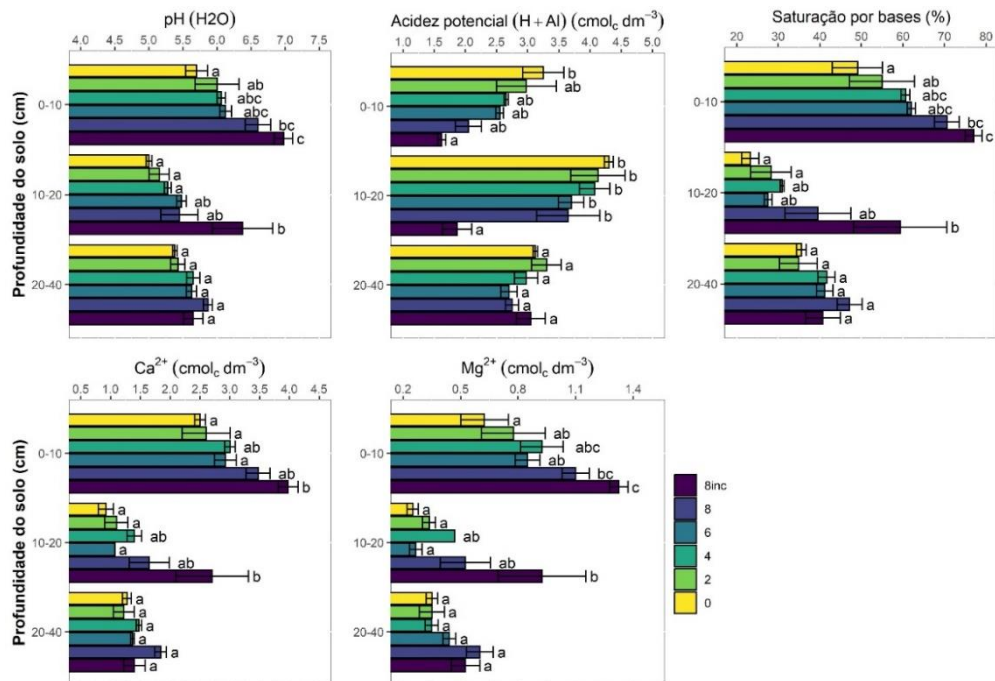
3 RESULTADOS

3.1 Atributos químicos do solo

Em todos os locais, as doses de calcário aplicadas em superfície e a maior dose incorporada elevaram os valores de pH e V % e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , além de reduzir os teores de H+Al na camada de 0-0,10 m, após três anos. Por sua vez, os efeitos das doses de calcários nos atributos químicos nas camadas subsuperficiais variaram de acordo com o modo de aplicação e local (Figuras 3, 4 e 5).

No Local 1, quando houve efeitos da calagem em superfície, eles restringiram-se à camada superficial (0 a 0,10 m) e mesmo quando a maior dose de calcário (8 Mg ha^{-1}) foi incorporada não houve efeitos na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 3). As doses de corretivo aplicadas na superfície, sem incorporação, reduziram os teores de H+Al e elevaram os valores de pH e V %, além dos teores de Ca e Mg do solo na camada de 0-0,10 m. Na camada de 0,10-0,20 m, somente o tratamento com a dose de 8 Mg ha^{-1} incorporada reduziu a acidez potencial e elevou os valores de pH e V % e os teores de Ca e Mg, quando comparado ao tratamento controle (Figura 3).

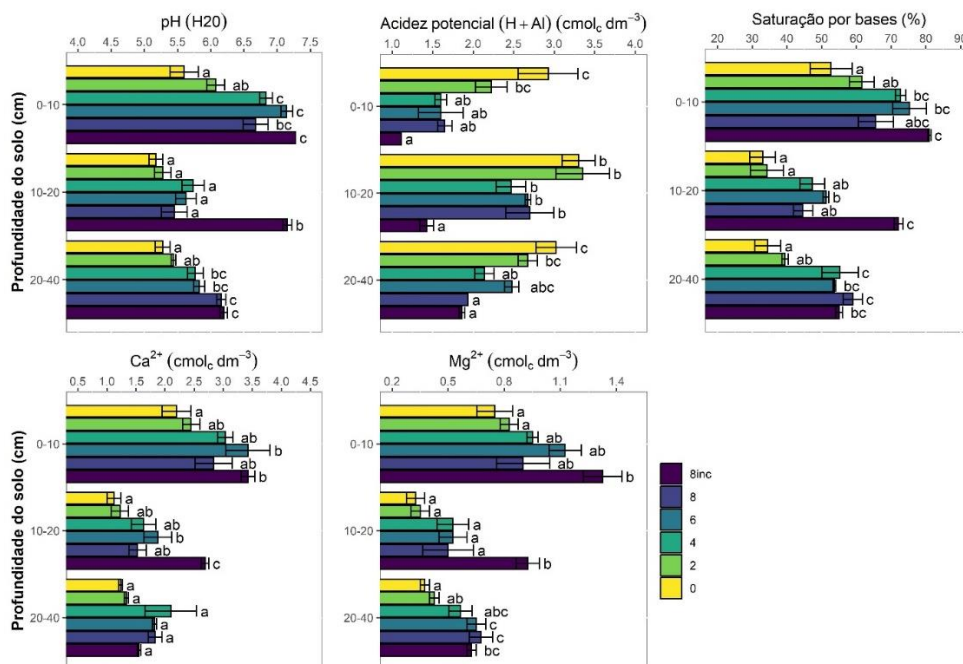
Figura 3 – Efeitos de doses de calcário aplicadas em superfície (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha^{-1}) e da dose de 8 Mg ha^{-1} incorporada nos atributos químicos do solo, após três anos da instalação do experimento no Local 1. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.



Fonte: Do autor (2024).

A maior dose de calcário (8 Mg ha^{-1}) incorporada no Local 2, elevou os valores de pH, V % e Mg^{2+} , comparada ao controle, além de ter reduzido os teores de H+Al nas três camadas de solo avaliadas (0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m). Já os teores de Ca^{2+} elevaram somente na camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 m comparado ao controle quando a maior dose foi incorporada. Por outro lado, os efeitos das doses de calcário aplicadas em superfície ocorreram somente quando as maiores doses (4, 6 e 8 Mg ha^{-1}) foram aplicadas e se concentraram principalmente nas camadas de 0-10 e 0,20-0,40 m (Figura 4). Estas maiores doses incrementaram os valores pH e V% e reduziram a acidez potencial (H+Al) nas camadas de 0-10 e 0,20-0,40 m em relação ao controle. Os teores de Ca^{2+} não foram modificados na camada de 20 a 40 m, nem com as maiores doses aplicadas na superfície. Por sua vez, os teores de Mg foram elevados nesta camada subsuperficial pela aplicação da maior dose de corretivo (8 Mg ha^{-1}), incorporada ou apenas aplicada na superfície, comparado ao controle.

Figura 4 – Efeitos de doses de calcário aplicadas em superfície ($0, 2, 4, 6$ e 8 Mg ha^{-1}) e da dose de 8 Mg ha^{-1} incorporada nos atributos químicos do solo, após três anos da instalação do experimento no Local 2. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

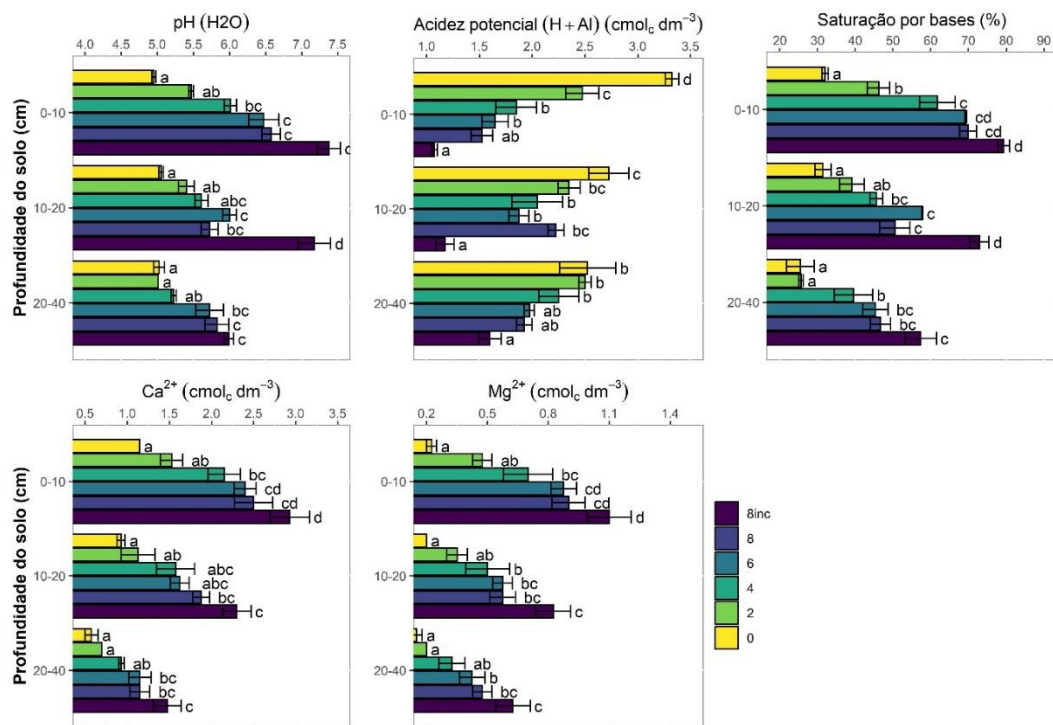


Fonte: Do autor (2024).

No Local 3, as doses de calcário acima de 4 Mg ha^{-1} aplicadas em superfície e a dose de 8 Mg ha^{-1} incorporada elevaram os valores de pH e V % nas três camadas avaliadas, sendo que os efeitos das doses aplicadas superficialmente nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m ocorreram geralmente quando as maiores doses (6 e 8 Mg ha^{-1}) foram aplicadas (Figura 5).

Quando a dose de 8 Mg ha⁻¹ foi incorporada, os teores de H+Al foram reduzidos nas três camadas, enquanto os efeitos das doses aplicadas em superfície ficaram restritos às camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ foram elevados nas três camadas, independentemente do modo de aplicação do calcário, sendo que os teores dos nutrientes nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m somente foram maiores do que os observados nas parcelas controle quando doses acima de 4 Mg ha⁻¹ foram aplicadas, enquanto na camada de 0,20-0,40 m os efeitos ocorreram apenas com as doses de 6 e 8 Mg ha⁻¹.

Figura 5 – Efeitos de doses de calcário aplicadas em superfície (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) e da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada nos atributos químicos do solo, após três anos da instalação do experimento no Local 3. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.



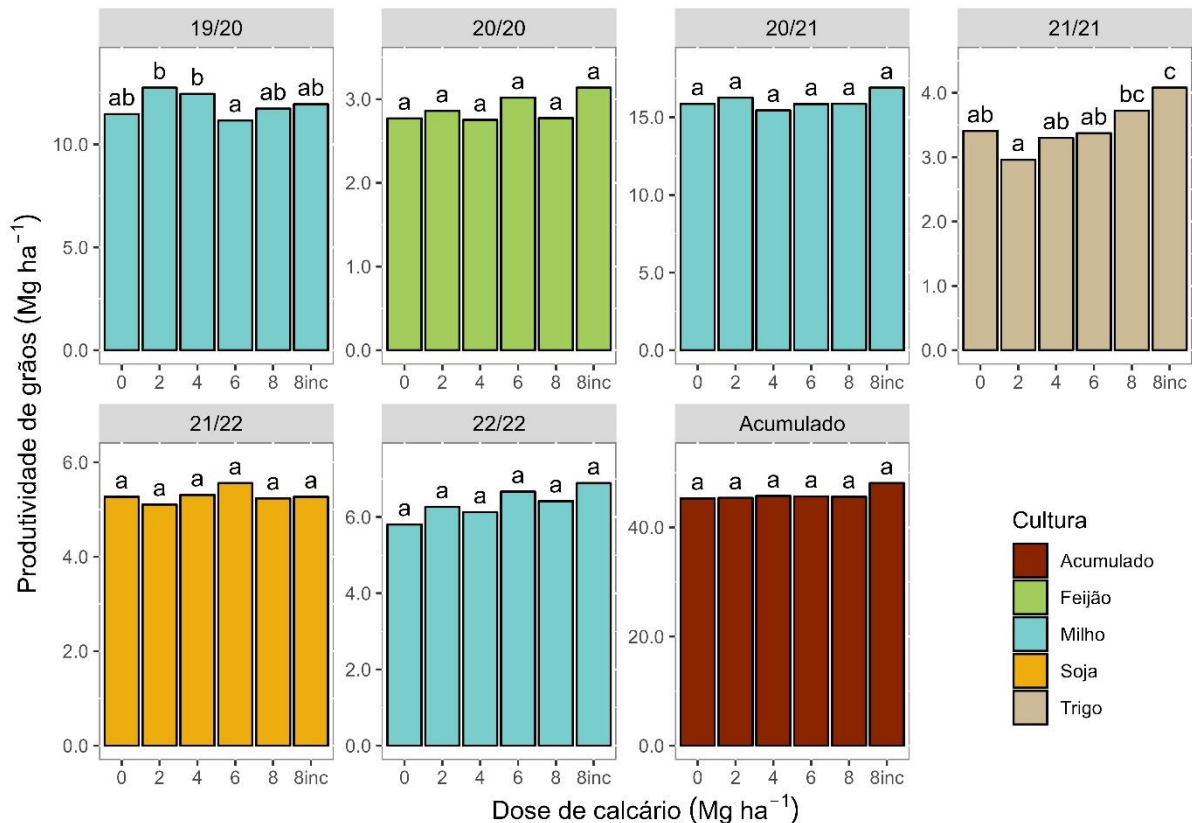
Fonte: Do autor (2024).

3.2 Produtividade de grãos

Os efeitos das aplicações de calcário nas produtividades das culturas variaram de acordo com o local e o modo de aplicação do corretivo. No Local 1, dos seis cultivos avaliados, dois tiveram alteração de produtividade. No cultivo de verão da safra 2019/20, a produtividade de milho foi maior com as doses de 2 e 4 Mg ha⁻¹ aplicadas em superfície, comparada à dose de 6 Mg ha⁻¹ sem incorporação. Por sua vez, no cultivo de inverno da safra 2020/21, a produtividade do trigo aumentou com a incorporação do corretivo, comparado com o controle e com a

aplicação das menores doses, sem incorporação. A produtividade acumulada de grãos também não foi modificada pelas doses de calcário (Figura 6).

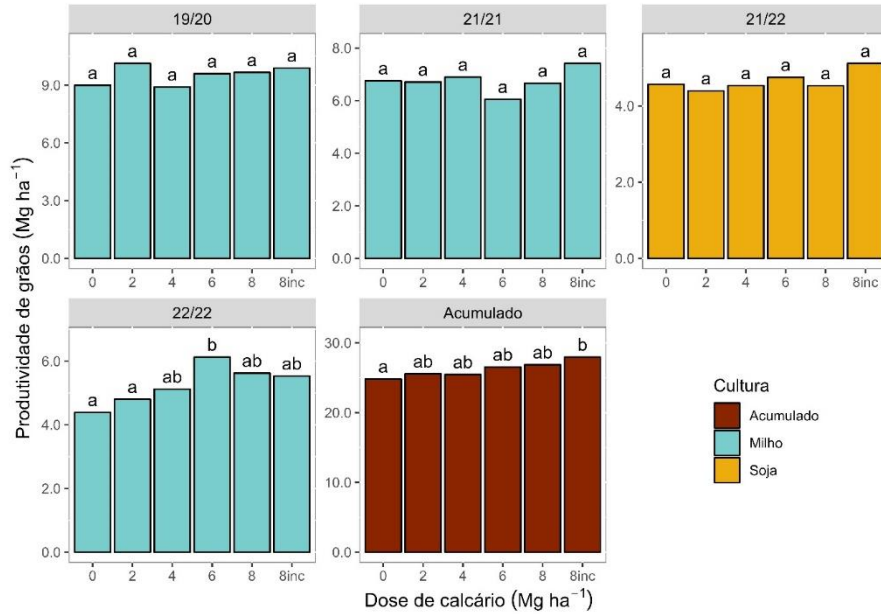
Figura 6 – Produtividades de grãos de cada uma das culturas e produtividade de grãos acumulada de seis cultivos em função das doses aplicadas em superfície (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) e da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada no Local 1. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.



Fonte: Do autor (2024).

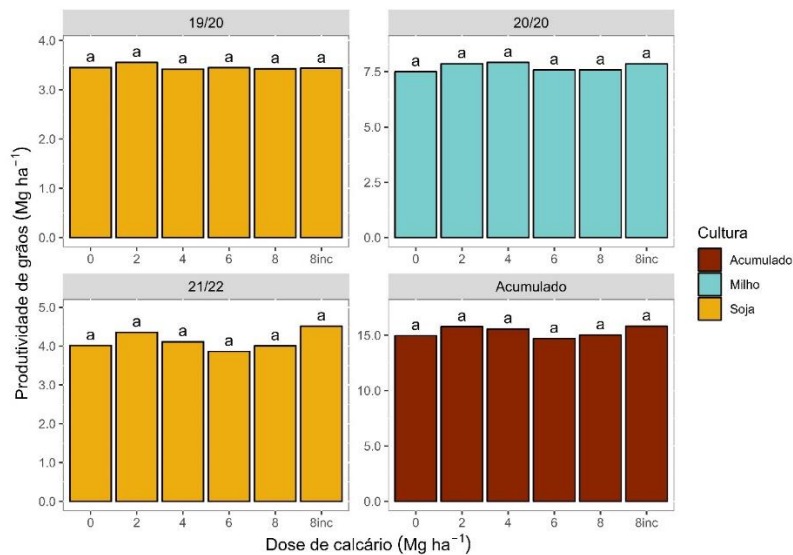
No Local 2, dos quatro cultivos avaliados, somente o milho da safra de inverno (2021/22) e a produtividade acumulada de grãos foram modificadas pelas doses de calcário. O milho de segunda safra (2021/22) apresentou maior produtividade com a dose de 6 Mg ha⁻¹ aplicada em superfície e o tratamento incorporado aumentou a produtividade acumulada de grãos em relação ao controle (Figura 7). No Local 3, as doses de corretivo não alteraram as produtividades das culturas (Figura 8).

Figura 7 – Produtividades de grãos de cada uma das culturas e produtividade de grãos acumulada de quatro cultivos em função das doses aplicadas em superfície (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) e da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada no Local 2. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 8 – Produtividades de grãos de cada uma das culturas e produtividade de grãos acumulada de três cultivos em função das doses aplicadas em superfície (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) e da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada no Local 3. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.



Fonte: Do autor (2024).

4 DISCUSSÃO

4.1 Atributos químicos do solo

A aplicação das doses calcário em superfície (0, 2, 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹) e da dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporada elevou os valores de pH e V % e os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, além de reduzir os teores de H⁺Al na camada de 0-0,10 m dos solos de todos os locais, após três anos de cultivo (Figuras 3, 4, e 5). No Local 1, com solo muito argiloso, os efeitos da calagem independentemente se aplicado e incorporado ou apenas distribuído na superfície, sem incorporação, se restringiu até 0,20 m de profundidade (Figura 3). Por outro lado, no solo do Local 3, com teor de argila inferior a 22%, houve efeito da calagem na maioria dos atributos químicos do solo avaliados até a profundidade de 0,40 m, mesmo nos tratamentos sem incorporação do corretivo da acidez (Figura 5).

Existem muitos trabalhos realizados a campo que mostram o efeito da calagem aplicada em superfície nos atributos químicos das camadas subsuperficiais dos solos em função do tempo de aplicação do corretivo (Caires *et al.*, 2000; Joris *et al.*, 2016). Normalmente para ocorrerem efeitos nas camadas subsuperficiais há necessidade de mais tempo do que quando o calcário é incorporado (Freiria *et al.*, 2008; Filho; Fageria; Zimmermann, 2005; Pöttker; Ben, 1998). Caires *et al.* (2000) observaram elevação dos valores de pH e V% até a camada de 0,60 m depois de 60 meses da aplicação do corretivo, enquanto Joris *et al.* (2016) observaram o aumento de Ca²⁺, Mg²⁺ e V% na camada de 0,10-0,20 m após 36 meses da aplicação do calcário.

Os resultados obtidos neste estudo mostram que este tempo de resposta às doses de calcário pode variar com a textura do solo e com as condições químicas iniciais de pH e V % da camada superficial dos solos. No solo do Local 1, com maiores teores de argila (Tabela 2) e maiores valores iniciais de pH e V % na camada superficial (Tabela 1), os efeitos das doses aplicadas na superfície se restringiram à camada de 0 a 0,10 m (Figura 3), enquanto no solo do Local 3, com menores teores de argila (Tabela 2) e menores valores iniciais de pH e V % na camada superficial (Tabela 1), os efeitos das doses aplicadas atingiram a camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 5). A dissolução do calcário é afetada pela redução da concentração de íons H⁺ na solução do solo (Allen; Hossner, 1991; Rheinheimer *et al.*, 2000). Isto ajuda a explicar por que a mesma dose aplicada nos três locais apresentou resultados diferentes. Como havia uma condição inicial de maiores valores de pH e V % e maiores teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ no solo do Local 1 (Tabela 1) em relação aos solos dos Locais 2 e 3, possivelmente a dissolução do calcário foi prejudicada no solo do Local 1.

Deve-se ressaltar também que além das melhores condições iniciais de fertilidade do solo e do maior teor de argila do solo do Local 1 (Tabela 2), comparado aos demais locais, outra variável que está envolvida na limitação dos efeitos do calcário em profundidade são os maiores valores absolutos de CTC a pH 7,0 e teores de matéria orgânica (MO), os quais são atributos que possuem relação diretamente proporcional com a textura do solo (Chesters; Corey, 1964; Martel *et al.*, 1978; Helling). Com maiores valores de CTC na camada superficial, há maior atração dos íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} à superfície dos coloides (PAULETTI, 2020), o que pode auxiliar na retenção dos cátions oriundos da dissolução do calcário pelas cargas negativas, reduzindo a mobilidade dos nutrientes no perfil do solo. Além disso, nos solos com maior CTC a pH 7,0, há necessidade de maiores doses de calcário para se atingir os mesmos valores de V % do que nos solos com CTC mais baixas. Por isto, no solo do Local 1, de modo geral para se elevar os valores de pH e V% e os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e reduzir H+Al em relação ao controle foram necessárias doses de 8 Mg ha^{-1} (Figura 3), enquanto no solo do Local 3 os mesmos atributos geralmente foram alterados com doses de 2 a 4 Mg ha^{-1} aplicadas na superfície (Figura 5).

Nos três locais, o efeito do tratamento incorporado foi similar à mesma dose aplicada em superfície na camada de 0-0,10 m. Por outro lado, os efeitos da calagem superficial na elevação do pH, Ca^{2+} e Mg^{2+} e redução do H+Al nas camadas subsuperficiais foram observadas apenas nos solos dos locais 2 e 3 (Figuras 3 e 4), os quais possuíam menor teor de argila do que solo do Local 1 (Tabela 2). Acredita-se que o principal fator que tenha aumentado a velocidade de correção das camadas abaixo de 0,10 m dos solos das áreas mais arenosas seja o deslocamento das partículas mais finas do calcário pelo movimento descendente da água por meio de canais e poros dos solos (Amaral *et al.*, 2004). Em solos arenosos há maior quantidade de macroporos (Naveed *et al.*, 2013), facilitando-se assim a maior percolação do corretivo nestes locais do que naqueles com maior percentual de argila. Ao chegar nas camadas mais profundas, com menor pH e maior H+Al, ocorre a dissolução do calcário, liberando Ca^{2+} e Mg^{2+} , bem como das bases OH^- e HCO_3^- , responsáveis pela neutralização dos íons H^+ e Al^{3+} e, por consequência elevação do pH e redução da acidez potencial (H+Al). No entanto, geralmente os efeitos nas camadas subsuperficiais ficaram restritos aos tratamentos com a aplicação das maiores doses (Figuras 4 e 5). Esse fato reforça a relação diretamente proporcional entre a movimentação do corretivo e a dose aplicada, como já observada por outros autores (Rheinheimer *et al.*, 2000; Caires *et al.*, 2008).

Os efeitos do calcário incorporado na camada de 0-0,20 m nos atributos químicos do solo em subsuperfície também variaram de acordo com os locais. A maior eficiência da

incorporação do corretivo em elevar o pH e reduzir o H+Al na camada de 0,10-0,20 m comparada à mesma dose aplicada em superfície nos três locais (Figuras 3, 4, e 5) se deve ao fato de a incorporação aumentar a superfície de contato do corretivo com o solo e, por consequência, elevar sua reatividade (Fageria; Baligar, 2008; Joris *et al.*, 2016). Os efeitos da calagem abaixo da camada na qual o corretivo foi incorporado ficaram restritos aos solos dos locais 2 e 3 (Figuras 4 e 5), os quais possuem menor percentual de argila (Tabela 2). Acredita-se que não houve efeitos na camada de 0,20-0,40 m no solo do Local 1 (Figura 3) por não ter ocorrido percolação do corretivo no perfil do solo, devido à maior quantidade de argila e, consequentemente, maior capacidade de retenção de cátions.

Em suma, os efeitos da calagem superficial nas camadas subsuperficiais visando corrigir o gradiente químico do perfil do solo ficaram restritos aos solos dos locais 2 e 3 e à utilização das maiores doses aplicadas (6 e 8 Mg ha⁻¹). Os resultados obtidos sugerem que o principal mecanismo envolvido na melhoria das camadas subsuperficiais é movimentação das partículas mais finas do calcário no perfil, sendo que esse fenômeno ocorre de maneira diretamente proporcional à dose aplicada e inversamente proporcional ao teor de argila do solo. No tratamento em que o calcário foi incorporado, houve melhoria das condições químicas do solo na camada de 0,10-0,20 m, principalmente no Local 2, o qual possuía menor pH e V % e maior H+Al do que os solos dos locais 1 e 3. Portanto, em condições de V % abaixo de 40 nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, situação não desejável para o desenvolvimento radicular em profundidade de culturas anuais (Cantarella *et al.*, 2022), a incorporação do corretivo é uma alternativa eficiente em reduzir o gradiente químico no perfil do solo e melhorar as condições para o desenvolvimento radicular em profundidade.

4.2 Produtividade de grãos

A respostas das culturas variam de acordo com o local, dose e modo de aplicação do calcário (Figuras 6, 7 e 8). Essas diferenças ocorreram principalmente devido às condições químicas iniciais do solo (Tabela 2). Li *et al.* (2019) observaram em uma meta análise global que a condição inicial do solo é um dos fatores que possui grande influência na resposta das culturas em produtividade. Além disso, as culturas avaliadas no presente estudo possuem diferentes níveis de tolerância à acidez e exigências nutricionais (Holland *et al.*, 2018; Fageria; Nascente, 2014). Muitos estudos sobre calagem em SPD relatam melhorias das condições químicas do solo, sem respostas das culturas em produtividade (Caires *et al.*, 1998, 2003, 2006b, 2008; Pottker; Ben, 1998; Moreira *et al.*, 2001), sendo atribuído às boas condições químicas iniciais dos solos para o desenvolvimento das plantas ou pelas ótimas condições

climáticas durante os períodos de avaliação. É sempre importante considerar as condições climáticas nos estudos que avaliam a produtividade das culturas em função da calagem, sendo que se espera maiores diferenças de produtividade em função dos manejos realizados em condições de baixa disponibilidade hídrica (Battist *et al.*, 2018).

Quando os cultivos foram avaliados de maneira isolada no presente estudo, observou-se a resposta em aumento de produtividade no milho e no trigo (Figuras 6, 7 e 8). Outros autores também observaram respostas com maior frequência e intensidade no milho em relação à soja (Pagani; Mallarino, 2015; Li *et al.*, 2019), o que pode ser atribuído à maior sensibilidade da cultura à acidez (Soto *et al.*, 2023). Acredita-se que o aumento da produtividade do trigo no Local 1 com a incorporação do calcário foi devido às melhorias das condições químicas do solo na camada de 0,10-0,20 m (Figura 3), as quais propiciaram condições para o aumento do enraizamento, permitindo as plantas suportarem o déficit hídrico ocorrido durante o desenvolvimento da cultura (Figura 2). Caires *et al.* (2006) observaram a sensibilidade do trigo ao Al^{3+} em SPD em condições de baixo pH e restrição hídrica. No entanto, a calagem promoveu maior crescimento radicular da cultura em função do aumento do pH, Ca^{2+} e V%, gerando aumento na produtividade. Em condições de Cerrado, também foi observado aumento de produtividade de trigo cultivado em períodos com restrição hídrica pela incorporação de calcário (Moraes *et al.*, 2023).

No atual contexto da agricultura, é imprescindível a adoção de um sistema de produção com maior diversidade de cultivos visando aumentar a eficiência agrícola com maior sustentabilidade (Moreira *et al.*, 2023). Diante disso, se torna mais coerente avaliar o modelo de produção como um todo durante maior período. No âmbito da calagem, a avaliação da produtividade acumulada de grãos é um ótimo indicador a ser utilizado, pois considera a resposta de todas as culturas inseridas no modelo de rotação ao longo dos anos. Nesse estudo, a produtividade acumulada do Local 1 não foi influenciada pela calagem (Figura 6), mesmo com o cultivo de cultura no inverno nos três anos avaliados (Tabela 3), época de maior restrição hídrica (Figura 2), que aumenta a sensibilidade das culturas à acidez solo (CAIRES, 2013). Acredita-se que um dos principais fatores que influenciaram nesse resultado foi a condição química inicial do solo na camada de 0,20-0,40 m, a qual possuía V % acima de 50. Esses resultados vão de encontro com a sugestão de Cantarella *et al.* (2022), que preconizam que a V % na camada de 0,20-0,40 m deve ser superior a 40 para se atingir altas produtividades.

No Local 2, a maior produtividade acumulada de grãos em relação ao controle foi obtida no tratamento em que a dose de 8 Mg ha⁻¹ foi incorporada ao solo (Figura 8). A V % no momento da implantação do experimento na camada de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m eram de 34,5

e 34,4, respectivamente (Tabela 1), níveis abaixo do preconizado por alguns autores para obter elevadas produtividades (Cantarella *et al.*, 2022; Moraes *et al.*, 2023). A condição de baixos valores de V % e pH, associados aos elevados teores de H+Al em subsuperfície reduz o desenvolvimento radicular das culturas, tornando-as mais sensíveis às variações climáticas e sujeitas a perdas de produtividade (Bossolani *et al.*, 2021; 2022; Moraes *et al.*, 2023). Uma forma de mitigar esse efeito é através da redução do gradiente químico com o aumento da V % em subsuperfície. No presente estudo, a calagem incorporada foi mais eficiente em elevar o pH, Ca²⁺, Mg²⁺ e reduzir os teores de H+Al na camada de 0,10-0,20 m, quando comparada com a mesma dose aplicada em superfície (Figura 4). Esses resultados sugerem que a produtividade acumulada de grãos no Local 2 foi maior com a calagem incorporada devido a maior eficiência em melhorar as condições químicas do solo em subsuperfície, propiciando um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular das culturas.

Embora as doses equivalentes a 4, 6 e 8 Mg ha⁻¹ de calcário aplicadas em superfície e o tratamento com a dose de 8 Mg ha⁻¹ incorporado ao solo terem melhorado as condições químicas em subsuperfície no Local 3 (Figura 5), a produtividade acumulada de grãos não foi afetada (Figura 8), mesmo com o tratamento controle apresentando valores de V % abaixo dos níveis recomendados (Figura 5) (Cantarella *et al.*, 2022; Moraes *et al.*, 2023). Acredita-se que a condição climática foi o fator que mais contribuiu para o resultado obtido, visto que dos três cultivos avaliados, dois foram semeados na safra verão com boa precipitação durante o desenvolvimento das culturas (Figura 2). O principal fator para a ocorrência de boa distribuição de chuvas consistiu na predominância da ocorrência do fenômeno climático La Niña Oscilação Sul durante o período do estudo, evento que melhora o padrão de distribuição de chuvas no cerrado brasileiro (Filho *et al.*, 2021). Com base em outros estudos que correlacionaram as condições químicas do solo com a produtividade de milho e soja (Oliveira; Pavan, 1996; Fageria, 2001; Bossolani *et al.*, 2021; 2022; Moraes *et al.*, 2023), pressupõe-se que os resultados seriam diferentes se durante o período avaliados tivesse predominado um padrão irregular de distribuição de chuvas.

5 CONCLUSÃO

Este estudo de campo concentrou-se em avaliar os efeitos de doses de calcário aplicadas na superfície e incorporada nos atributos químicos do solo e produtividade das culturas em três locais com diferentes teores de argila. Com os resultados obtidos pode-se concluir que: (i) os efeitos da calagem aplicada em superfície nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m é diretamente proporcional à dose aplicada e inversamente proporcional ao teor de argila do solo; (ii) a incorporação do corretivo ao solo na camada de 0,0-0,2 m é mais eficiente em melhorar os atributos químicos solo na camada de 0,10-0,20 m em relação à mesma dose aplicada em superfície (iii) o preparo ocasional do solo através da incorporação do calcário com gradagem é uma alternativa para correção das camadas subsuperficiais em solos argilosos com alto gradiente químico.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, E. R.; HOSSNER, L. R. **Factors affecting the accumulation of surface-applied agricultural limestone in permanent pastures.** Soil Science, Madson, 1991.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* **Koöppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift, 2014. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AMARAL, A. S. *et al.* **Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto.** R. Bras. Ci. Solo, 2004.
- BATTIST, Rafael *et al.* **Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil.** International Journal of Plant Production, 2018. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>.
- BOSSOLANI, João W. *et al.* **Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics.** Agron. Sustain, 2022.
- BOSSOLANI, João W. *et al.* **Long-Term Lime and Phosphogypsum Amended-Soils Alleviates the Field Drought Effects on Carbon and Antioxidative Metabolism of Maize by Improving Soil Fertility and Root Growth.** Front. Plant Sci, 2021.
- CAIRES, Eduardo F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto.** Informações agronômicas, 2013.
- CAIRES, Eduardo F. *et al.* **Surface Application of Lime for Crop Grain Production Under a No-Till System.** Agronomy Journal, 2005. Doi:10.2134/agronj2004.0207.
- CAIRES, Eduardo F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. **Calagem Na Superfície Em Sistema Plantio Direto.** R. Bras. Ci. Solo, 2000.
- CAIRES, Eduardo Fávero *et al.* **Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo.** R. Bras. Ci. Solo, 1998.
- CAIRES, Eduardo Fávero *et al.* **Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto.** R. Bras. Ci. Solo, 2003.
- CAIRES, Eduardo Fávero *et al.* **Soil acidity, liming and soybean performance under no-till.** Piracicaba: Sci. Agric, 2008.
- CAIRES, Eduardo Fávero *et al.* **Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications.** Piracicaba: Sci. Agric, 2006.
- CAIRES, Eduardo Fávero *et al.* **Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system.** Piracicaba: Sci. Agric, 2006.
- CANTARELLA, Heitor *et al.* **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico, 2022.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. **Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production.** *Advances in agronomy*, 2008.

FAGERIA, Nand Kumar. **Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado.** Brasília: Pesq. agropec. bras., 2001.

FAGERIA, Nanda K.; NASCENTE, Adriano S. **Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production.** *Advances in agronomy*, 2014.

FILHO, Morel Pereira Barbosa; FAGERIA, Nand Kumar; ZIMMERMANN, Francisco José Pfeilsticker. **Attributes of soil fertility and bean and soybean productivity influenced by liming applied on surface or mixed to the soil.** Lavras: Ciênc. agrotec, 2005.

FILHO, Washington Luiz Félix Correia *et al.* **Influence of the El Niño–Southern Oscillation and the synoptic systems on the rainfall variability over the Brazilian Cerrado via Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data.** *International Journal of Climatology*, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7417>.

FREIRA, André Costa *et al.* **Alterações em atributos químicos do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado.** Maringá: Acta Sci. Agron., 2008.

HELLING, Charles S.; CHESTERS, G.; COREY, R. B. **Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution.** *Soil Science Society of America Journal*, 1964.

HOLLAND, J. E. *et al.* **Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review.** *Science of the Total Environment*, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020>.

JORIS, Helio Antonio Wood *et al.* **Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil.** *Soil & Tillage Research*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.04.009>.

LI, Yuan *et al.* **Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis.** *Journal of Soils and Sediments*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>.

LOPES A. S.; GUILHERME L. R. G. **A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil.** *Advances in Agronomy*, 2016.

MARTEL, Y. A.; DE KIMPE, C. R.; LAVERDIERE, M. R. **Cation-exchange capacity of clay-rich soils in relation to organic matter, mineral composition, and surface area.** *Soil Science Society of America Journal*, 1978.

MENDES, Iêda de C. *et al.* **Tecnologia BioAS : uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo .** Embrapa Cerrados: Planaltina 2021.

MOAREAS, Flávio A. de *et al.* **Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils.** *European Journal of Agronomy*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>.

MOREIRA, Silvino G *et al.* **Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage.** Acta Scientiarum Agronomy: Maringá, 2017.

MOREIRA, Silvino G. **Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais.** Informações Agônomicas, 2019.

MOREIRA, Silvino Guimarães *et al.* **Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja.** R. Bras. Ci. Solo, 2001.

MOREIRA, Silvino Guimarães *et al.* **Circular agriculture increases food production and can reduce N fertilizer use of commercial farms for tropical environments.** Science of the Total Environment, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163031>.

MOREIRA, Silvino Guimarães *et al.* **Soybean macronutrient availability and yield as affected by tillage system.** Acta Scientiarum. Agronomy, 2020.
<http://periodicos.uem.br/ojs/acta> ISSN on-line: 1807-8621
Doi:10.4025/actasciagron.v42i1.42973

NAVEED, Muhammad *et al.* **Revealing Soil Structure and Functional Macroporosity along a Clay Gradient Using X-ray Computed Tomography.** Soil Science Society of America Journal, 2013. doi:10.2136/sssaj2012.0134.

OLIVEIRA, Dener Márcio da Silva *et al.* **Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review.** Rev Bras Cienc Solo, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220055>.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. **Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production.** Soil and Tillage Research, 1996.

PAGANI, Agustín; MALLARINO Antonio P. **On-Farm Evaluation of Corn and Soybean Grain Yield and Soil pH Responses to Liming.** Agronomy Journal, Volume 107, Issue 1, 2015. doi:10.2134/agronj14.0314.

PAULETTI, V. **Equilíbrio entre bases do solo e produtividade das culturas.** Informações Agrônomicas, 2020.

PEIXOTO, Devison S. *et al.* **Occasional tillage in no-tillage systems: A global metaanalysis.** Science of the Total Environment, 2020.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. **Calagem Para Uma Rotação De Culturas No Sistema Plantio Direto.** R. Bras. Ci. Solo, 1998.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* **Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2000.

SHUMAN, L. M. **Effect of Liming on the Distribution of Manganese, Copper, Iron, and Zinc Among Soil Fractions.** Soil Sci. Soc. Am., 1986.

SILVA, F. C. da (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SOTO, Andrea Leiva *et al.* **Managing soil acidity vs. soil Ca:Mg ratio: What is more important for crop productivity?** *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 9, e20210, 2023. <https://doi.org/10.1002/cft2.20210>.

TRIPLETT, G. B., Jr.; DICK, Warren A. **No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture!** *Agronomy Journal*, 2008. doi:10.2134/agronj2007.0005c.

YAGI, Renato; FIDALSKI Jonez; TORMENA, Cássio Antonio. **The incorporation of limestone in consolidated no-tillage system reduces carbon stock in soil macroaggregates.** *Ciência Rural*, Santa Maria, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140339>.

ZANCANARO, Leandro *et al.* **Boletim de Pesquisa safra 2019/20: Manejo do solo, adubação e nutrição da cultura da soja.** Entrelinhas: Fundação MT, 2020.